PHYSIKALISCHE ZEITSCHRIFT

No. 24. 15. Dezember 1915. Redaktionsschluß für No. 1 am 23. Dezember 1915. 16. Jahrgang.

INHALT:

Originalmitteilungen:

E. Lübcke, Über einen Apparat zur harmonischen Analyse und Synthese von periodischen Kurven. S. 453.

Zusammenfassende Bearbeitungen:

K. Fajans, Das periodische System der Elemente, die radioaktiven Umwandlungen und die Struktur der Atome. S. 456.

Besprechungen:

Deutsche Südpolarexpedition 1901 bis 1903. Atlas. Heft 2—4. S. 487.

D. Owen, Recent Physical Research. S. 487.

S. P. Thompson, Radiations visibles et invisibles. S. 487.

L. v. Bortkiewicz, Die radioaktive Strahlung als Gegenstand wahrscheinlichkeitstheoretischer Untersuchungen. S. 487.

Nachtrag zur Übersicht über die Kriegsbeteiligung der Deutschen Physiker. S. 488.

Personalien. S. 488.

Gesuche. S. 488.

ORIGINALMITTEILUNGEN.

Über einen Apparat zur harmonischen Analyse und Synthese von periodischen Kurven.

Von Ernst Lübcke.

1. Analyse.

Wird eine empirisch gegebene Funktion $y = f(x)$ in dem Intervall von 0 bis 2π als periodisch betrachtet, so ist es möglich, diese Funktion in eine Fourier-Reihe zu entwickeln, d. h. y in der Form darzustellen:

$$y = b_0 + b_1 \cdot \cos x + b_2 \cdot \cos 2x + \cdots + b_n \cdot \cos(nx) + a_1 \cdot \sin x + a_2 \cdot \sin(2x) + \cdots + a_n \cdot \sin(nx).$$

Die Koeffizienten a_k und b_k müssen bestimmt werden. Bekanntlich erhält man sie aus der gegebenen Funktion durch die Integrale:

$$\left.\begin{aligned} a_k &= \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} y \cdot \sin(kx)\, dx \\ b_k &= \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} y \cdot \cos(kx)\, dx \end{aligned}\right| \quad k = 0, 1, 2, \cdots, n.$$

Der im Folgenden beschriebene Apparat gestattet diese Koeffizienten bis $k = 8$ dadurch auf mechanischem Wege zu bestimmen, daß man die Integrale durch endliche Summen annähert. Die Periode wird in 16 Teile geteilt. Das Intervall dx ist jetzt endlich: $\triangle x = 2\pi : 16$; an den 16 Abszissenwerten

$$x_\lambda = \lambda \cdot \frac{2\pi}{16} \qquad (\lambda = 0, 1, \cdots, 15)$$

der Periode sind die Funktionswerte gleich y_λ ($\lambda = 0, 1, \cdots, 15$). Für die Koeffizienten erhält man also die Näherungswerte:

$$\left.\begin{aligned} a_k &= \frac{1}{8}\sum_{\lambda=1}^{15} y_\lambda \cdot \sin\left(k \cdot \lambda \cdot \frac{2\pi}{16}\right) \\ b_k &= \frac{1}{8}\sum_{\lambda=0}^{15} y_\lambda \cdot \cos\left(k \cdot \lambda \cdot \frac{2\pi}{16}\right) \end{aligned}\right| \quad k = 0, 1, 2, \cdots, 8.$$

Nach einem von H. von Sanden[1]) angegebenen graphischen Verfahren erhält man z. B. für:

$$8 \cdot a_1 = y_1 \cdot \sin\left(1 \cdot \frac{2\pi}{16}\right) + y_2 \cdot \sin\left(2 \cdot \frac{2\pi}{16}\right) + y_3 \cdot \sin\left(3 \cdot \frac{2\pi}{16}\right) + \cdots + y_{15} \cdot \sin\left(15 \cdot \frac{2\pi}{16}\right)$$

und etwa für:

$$8 \cdot b_3 = y_0 \cdot \cos\left(0 \cdot \frac{2\pi}{16}\right) + y_1 \cdot \cos\left(5 \cdot \frac{2\pi}{16}\right) + y_2 \cdot \cos\left(10 \cdot \frac{2\pi}{16}\right) + \cdots + y_{15} \cdot \cos\left(11 \cdot \frac{2\pi}{16}\right).$$

Die 11 im letzten Ausdruck ist entstanden aus $75 - 64 = 11$, d. h. $k \cdot \lambda - n \cdot 16$, wo n eine so gewählte ganze Zahl ist, daß die Differenz stets kleiner als 16 ist. Es handelt sich jetzt darum, die Multiplikation jeder Ordinate

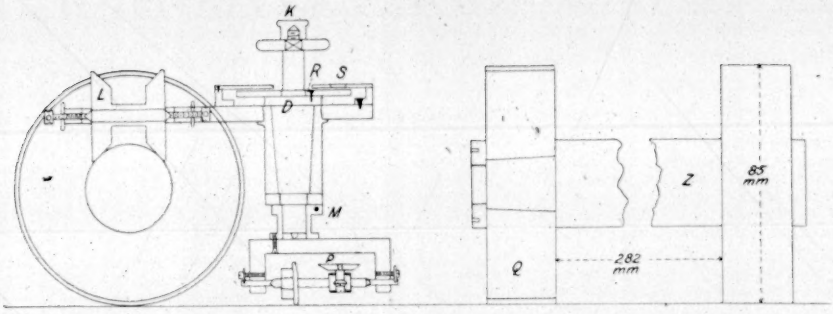
$$y_\lambda \qquad (\lambda = 0, 1, \cdots 15)$$

mit dem zugehörigen Sinus- bzw. Kosinuswert auszuführen und die Produkte zu summieren.

Zur Multiplikation benutzt man ein Planimeterrädchen mit rundem Rande[2]). Ist r der Radius des Rädchens, und wird dies um den Winkel ϑ gedreht, so ist die Abwicklung der

1) H. v. Sanden, Zeitschr. f. Math. u. Phys. **61**, 430, 1912; Archiv für Elektrotechnik **1**, 42, 1912.

2) A. Amsler, Über mechanische Integrationen, in W. Dyk, Katalog mathematischer und mathematisch-physikalischer Modelle, Apparate und Instrumente. München 1892. S. 99.



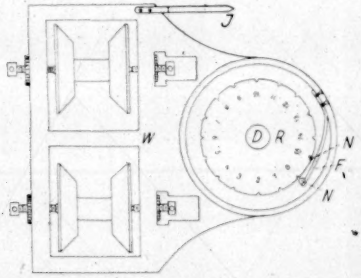


Fig. 1.

Rolle $u = r \cdot \delta$. Verschiebt man nun das Rädchen, das mit sanftem Druck auf eine nicht zu glatte Papierfläche aufliegt, so daß sein Berührungspunkt mit der Unterlage eine Gerade s beschreibt, welche mit der Achse des Planimeterrädchens den Winkel α bildet, dann findet gleichzeitig ein Rollen und Gleiten des Rädchens statt, und es wird $u = s \cdot \sin\alpha$. Die Werte von α sind in diesem Falle

$$\lambda \cdot \frac{2\pi}{16} \quad (\lambda = 0, 1, \cdots, 15)$$

und werden durch Drehen des Knopfes K im Schauloch S eingestellt (Fig. 1). Die Feder F hält das Rädchen R durch Einspringen in die Nute N leicht an dieser Stelle fest. Der ganze Wagen W, der die Drehvorrichtung D mit dem Rädchen R und dem Zählwerk P trägt, ist durch die Laufräder L auf dem Zylinder Z bequem verschiebbar. Um das Produkt

$$y_\mu \cdot \sin\left(k \cdot \mu \cdot \frac{2\pi}{16}\right)$$

zu bilden, stellt man im Schauloch den Wert $k \cdot \mu$ (bzw. wenn $k \cdot \mu > 16$ ist, $k \cdot \mu - n \cdot 16$, wo n eine ganze Zahl ist) ein und fährt dann mit dem Index I die Strecke y_μ ab.

Die Summation wird dadurch gebildet, daß man den Wagen W am Knopf K etwas anhebt, so daß das Planimeterrädchen nicht mehr aufliegt, den Zylinder Z um $\triangle x = \frac{2\pi}{16}$ verschiebt und den Wert $k \cdot (\mu + 1)$ im Schauloch einstellt und die Ordinate $y_{\mu+1}$ abfährt usw.

Ehe man die Analyse vornimmt, muß man die Räder Q genau parallel der Nullinie laufend machen. Mit Hilfe der Klemmuffe M nimmt man die Justierung vor, indem man die Achse des Rädchens genau senkrecht zur Nullinie stellt, wenn im Schauloch die Zahl 0 steht. Die übrige mechanische Ausführung ist aus den Fig. 1 und 2 zu ersehen[1]).

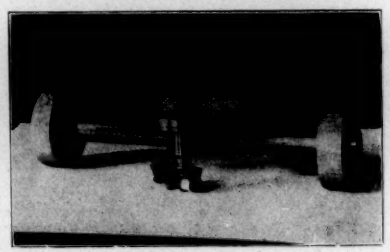


Fig. 2.

2. Synthese.

Liegt umgekehrt die Aufgabe vor, den Verlauf einer analytisch gegebenen Fourierschen Reihe graphisch wiederzugeben, so lassen sich mit dem Analysator auch sehr rasch die Werte von 16 äquidistanten Ordinaten angeben. Es ist dann allgemein:

1) Ich möchte auch an dieser Stelle der Firma Günther & Tegetmeyer in Braunschweig für die exakte Ausführung trotz der erschwerenden Umstände der Kriegszeit bestens danken. Sie hat auch die weitere Herstellung des Analysators übernommen.

$$y = b_0 + b_1 \cos x + b_2 \cdot \cos(2x) + \cdots + a_1 \sin x + a_2 \cdot \sin(2x) + \cdots$$

und hier

$$y_\lambda = b_0 \cdot \cos\left(0 \cdot \lambda \cdot \frac{2\pi}{16}\right) + b_1 \cdot \cos\left(1 \cdot \lambda \cdot \frac{2\pi}{16}\right) + b_2 \cdot \cos\left(2 \cdot \lambda \cdot \frac{2\pi}{16}\right) + \cdots + a_1 \cdot \sin\left(1 \cdot \lambda \cdot \frac{2\pi}{16}\right) + a_2 \cdot \sin\left(2 \cdot \lambda \cdot \frac{2\pi}{16}\right) + \cdots.$$

$(\lambda = 0, 1, \cdots, 15)$

Natürlich können auch hier nur 7 Sinus- und 9 Kosinusglieder einen Einfluß auf die Kurvenform ausüben. Die Werte a_k und b_k trägt man nebeneinander in gleichem Maßstabe auf Papier auf und verfährt wie bei der Analyse. Um bei der Einstellung der Zahl im Schauloch zur Ausführung der Analyse keinen Fehler zu machen, legt man am besten eine Tabelle folgender Art daneben:

Ordinate	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
1	1	2	3	4	5	6	7
2	2	4	6	8	10	12	14
3	3	6	9	12	15	2	5
4	4	8	12	0	4	8	12
5	5	10	15	4	9	14	3
6	6	12	2	8	14	4	10
7	7	14	5	12	3	10	1
8	8	0	8	0	8	0	8
9	9	2	11	4	13	6	15
10	10	4	14	8	2	12	6
11	11	6	1	12	7	2	13
12	12	8	4	0	12	8	4
13	13	10	7	4	1	14	11
14	14	12	10	8	6	4	2
15	15	14	13	12	11	10	9

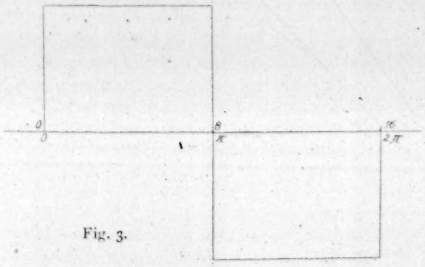


Fig. 3.

Die entsprechende Tabelle für die b-Werte ist um 4 Zahlen verschoben, da $\cos \cdot \pi/2 = \sin \cdot 0$ ist und hier 2π in 16 Teile geteilt ist.

Ordinate	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8
0	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	4	6	8	10	12	14	0	2	4
3	4	7	10	13	0	3	6	9	12
4	4	8	12	0	4	8	12	0	4
5	4	9	14	3	8	13	2	7	12
6	4	10	0	6	12	2	8	14	4
7	4	11	2	9	0	7	14	5	12
8	4	12	4	12	4	12	4	12	4
9	4	13	6	15	8	1	10	3	12
10	4	14	8	2	12	6	0	10	4
11	4	15	10	5	0	11	6	1	12
12	4	0	12	8	4	0	12	8	4
13	4	1	14	11	8	5	2	15	12
14	4	2	0	14	12	10	8	6	4
15	4	3	2	1	0	15	14	13	12

Eine ähnliche Tabelle ist bei der Synthese leicht aufzustellen.

3. Genauigkeit des Apparates.

Zunächst wurde der Apparat justiert, d. h. im Schauloch 0 eingestellt und das Zählwerk mit der Klemmschraube M so verstellt, daß sich das Rad beim Verschieben des Schlittens nicht drehte; sodann wurde er geeicht, d. h. die Umdrehungszahl des Rädchens bestimmt, die zur Abwicklung einer bestimmten Anzahl Zentimeter gehört. Es wurde im Schauloch 4 eingestellt und eine Strecke von 10 cm durchfahren. Der mittlere Wert, der sich aus zehnmaligem Abfahren ergab, betrug 106,42 Skt. mit einem Fehler von $\pm$ 0,35 Proz. Es ist also ein Skalenteil gleich 0,94 mm.

Um die Meßgenauigkeit des Analysators zu prüfen, wurde die bekannte Kurve (Fig. 3)

$$f(x) = \frac{4h}{\pi}\left(\sin x + \frac{1}{3} \cdot \sin(3x) + \frac{1}{5} \cdot \sin(5x) + \frac{1}{7} \cdot \sin(7x) + \cdots\right),$$

wo $h = 60{,}0$ mm war, in die einzelnen Sinuswellen zerlegt. Die Mittelwerte von je 6 Ablesungen waren für

a_1	643,62	Skt.	mit	einer	maximalen	Abweichung	vom	Mittelwert	um	$\pm$ 0,22 Proz.
a_3	191,85	„	„	„	„	„	„	„	„	$\pm$ 0,34 „
a_5	85,32	„	„	„	„	„	„	„	„	$\pm$ 0,49 „
a_7	25,66	„	„	„	„	„	„	„	„	$\pm$ 1,2 „

Folgende Zusammenstellung soll eine Übersicht über die Leistungsfähigkeit der einzelnen Methoden liefern. Es enthält Kolonne I die Werte von

$$\frac{4h}{\pi}, \frac{4h}{3\pi}, \frac{4h}{5\pi}, \frac{4h}{7\pi}; \quad h = 60{,}000 \text{ mm}.$$

Die Werte der Kolonne II sind mit dem Analysator von O. Mader[1]) erhalten.

Kolonne III berücksichtigt 24 äquidistante Ordinaten. Die Werte sind mit dem Rech-

1) O. Mader, Elektr. Zeitschr. 30, 847, 1909.

nungsformular von Runge und Emde[1]) bestimmt für $h = 60{,}00$ mm.

Kolonne IV: Die oben mitgeteilten Werte des Analysators in Millimeter.

Kolonne V: Auch für 16 Ordinaten nach obigen Formeln, aber rechnerisch mit fünfstelligen Logarithmen ermittelt. In Kolonne VI sind nur 12 äquidistante Ordinaten berücksichtigt[2]).

	I $f(x)$ mm	II Mader mm	III 24 Ord. mm	IV Analys. mm	V 16 Ord. mm	VI 12 Ord. mm
a_1	76,396	76,87	75,95	75,62	74,411	74,63
a_3	25,465	25,62	24,13	22,54	22,450	20,00
a_5	15,279	15,67	13,06	10,02	10,023	5,37
a_7	10,914	7,78	7,67	3,02	2,984	—

Ein weiterer Vorzug des Apparates ist die Synthese von Sinuswellen zu einer periodischen Funktion. Als Beispiel — und zwar ein ziemlich ungünstiges, wie es in den vorkommenden Fällen in der Physik und Elektrotechnik selten sein wird — ist wiederum die Funktion

$$y = \frac{h}{4\pi}(\sin x + \frac{1}{3}\cdot\sin(3x) + \frac{1}{5}\cdot\sin(5x) + \cdots)$$

dargestellt. Es wird $h = 60{,}0$ mm gewählt und dann a_1, a_3, a_5, a_7 bestimmt. Diese Werte werden als Strecken dargestellt und mit dem Apparat nach den Formeln unter 2 abgefahren. Man findet dann statt des Wertes $h = 60{,}0$ mm folgende Werte für eine halbe Periode:

$y_1 = 70{,}5$ mm, $y_2 = 53{,}3$ mm, $y_3 = 64{,}8$ mm, $y_4 = 53{,}4$ mm, $y_5 = 64{,}0$ mm, $y_6 = 54{,}5$ mm, $y_7 = 70{,}4$ mm, $y_8 = 0{,}1$ mm (Fig. 3).

Bei der Kreisteilung ist die Zahl 16 gewählt, weil die in der Praxis vorkommenden Oberschwingungen oberhalb der 7. meistens von sehr kleiner Amplitude, also zu vernachlässigen sind und man so mit einem Minimum an Arbeitsaufwand das Gewünschte erreicht. Es ist selbstverständlich leicht, die Kreisteilung so abzuändern, daß man, natürlich mit mehr Einzeloperationen, eine höhere Zahl von Koeffizienten bestimmen kann und diese mit größerer Genauigkeit.

Zusammenfassung.

Es wird ein Apparat beschrieben, der unter Benutzung von 16 äquidistanten Ordinaten einer periodischen Funktion bei beliebiger Basislänge einer Periode die Bestimmung von 7 Sinus- und 9 Kosinusgliedern einer Fourierschen Reihe erlaubt, mit einem Fehler von etwa 0,3 Proz. Weiterhin ist der Apparat dazu geeignet, für eine vorgegebene Funktion von 7 Sinus- und 9 Kosinusgliedern 16 äquidistante Ordinatenwerte zu liefern.

Göttingen, den 9. November 1915. Institut für angewandte Elektrizität.

(Eingegangen 6. Dezember 1915.)

1) C. Runge und F. Emde, Rechnungsformular zur Zerlegung einer empirisch gegebenen periodischen Funktion in Sinuswellen. Braunschweig 1913.

2) H. v. Sanden, Praktische Analysis. Leipzig u. Berlin 1914. S. 124.

ZUSAMMENFASSENDE BEARBEITUNGEN.

Das periodische System der Elemente, die radioaktiven Umwandlungen und die Struktur der Atome.[1])

Von K. Fajans.

I. Einleitung (Inhaltsübersicht).

Auf Veranlassung der Schriftleitung soll im Folgenden über das im Titel genannte Thema berichtet werden. Die Fülle der damit in Zusammenhang stehenden Probleme macht es unmöglich, sie alle im Rahmen eines Aufsatzes zu erschöpfen, und es sei deshalb eine Übersicht der behandelten Fragen gegeben, wobei auch die Gesichtspunkte erläutert werden, die bei der Auswahl des Stoffes maßgebend gewesen sind.

Das Hauptthema des Berichtes bilden die Beziehungen zwischen chemischen Elementen. Die erste Periode der Erfor-

1) Es seien hier einige Abhandlungen aufgezählt, die öfters zitiert werden.

1. E. Rutherford, Radioaktive Substanzen und ihre Strahlungen, Leipzig 1913.
2. F. Soddy, Die Chemie der Radioelemente I, Leipzig 1912 (Englisches Original 1911).
3. Derselbe. II. Teil, Leipzig 1914.
4. G. v. Hevesy, diese Zeitschr. **14**, 49, 1913.
5. A. S. Russell, Chemical News **107**, 49, 1913.
6. K. Fajans, diese Zeitschr. **14**. 131 u. 136, 1913.
7. Derselbe, Ber. d. D. Chem. Ges. **46**, 422, 1913.
8. F. Soddy, Chemical News **107**, 97, 1913; Jahrbuch d. Radioakt. u. Elektronik **10**, 188, 1913.
9. A. Fleck, Trans. Chem. Soc. **103**, 381 u. 1052, 1913.
10. K. Fajans, Sitzungsber. d. Heidelberger Akad. d. Wissensch. 1914, A. 11.
11. Sir Ernest Rutherford, Phil. Mag. **27**, 488, 1914.
12. N. Bohr, Phil. Mag. **26**, 1 u. 476, 1913.
13. H. G. Moseley, ebenda **26**, 1024, 1913 u. **27**, 703, 1914.
14. K. Fajans, Elster-Geitel-Festschrift S. 623, 1915.
15. Derselbe, Die Naturwissenschaften **2**, 429 u. 463, 1914.

Die Abhandlungen 3 und 15 stellen frühere zusammenfassende Darstellungen des im vorliegenden Bericht behandelten Gebietes dar. Die Kapitel II, IV und VI des Berichtes haben viel Gemeinsames mit den Kapiteln 4, 6 und 8 der Abhandlung 15. Die übrigen Teile des Berichtes sind im wesentlichen neu zusammengestellt.

schung dieser Beziehungen hat ihren Höhepunkt mit der Aufstellung des periodischen Systems der Elemente, das hier natürlich als bekannt vorausgesetzt wird, erreicht. Abgesehen von der großen Bedeutung, die dieses System als Grundlage der Systematik chemischer Elemente besitzt, schien es hauptsächlich nach zwei Richtungen zu wichtigen Erkenntnissen geführt zu haben: Einerseits identifizierte man die Zahl der Stellen des Systems mit der der überhaupt existierenden Elemente.

Anderseits hat der große klassifikatorische Erfolg, den die Entdecker des periodischen Systems durch Anordnung der Elemente nach steigenden Atomgewichten erzielt haben, und die Möglichkeit, die meisten Eigenschaften der Elemente als periodische Funktionen des Atomgewichtes darzustellen, begreiflicherweise zu der Auffassung geführt, daß das Atomgewicht sehr viele Eigenschaften der Elemente eindeutig bestimmt.

Eine zweite Periode der Elementenforschung setzte ein mit der Entdeckung der Radioaktivität und Aufstellung der Theorie radioaktiver Umwandlungen. Die Elemente können seitdem nicht mehr als unvergängliche Gebilde angesehen werden, es mußte der grundlegende Begriff ihrer Lebensdauer eingeführt werden. Zwischen den vielen neu entdeckten Radioelementen bestehen dabei überraschend einfache genetische Beziehungen.

Die so oft schon dargestellten Forschungsmethoden, die zu diesen Erkenntnissen geführt haben, werden im Folgenden auch als bekannt vorausgesetzt und ihre Resultate auf Grund der Tabelle I, die den heutigen Stand der Umwandlungslehre wiedergibt, als verständlich angenommen[1]). Nur einige auf indirektem Wege gewonnene Aufschlüsse und mehrere noch nicht genügend geklärte Fragen werden im Kapitel V kurz besprochen.

Die radioaktiven Elemente bildeten jedoch längere Zeit eine Welt für sich und zeigten nur wenige Berührungspunkte mit dem allgemeinen System der Elemente. Es schien ihre große Zahl sogar in Widerspruch mit dem periodischen System zu stehen, wie aus dem Kapitel II, das die Atomgewichte der Radioelemente behandelt, besonders klar hervorgeht. Diese Sachlage änderte sich aber vollkommen, als es gelungen war auf Grund der chemischen Eigenschaften der Radioelemente ihr Verhältnis zum periodischen System aufzuklären.

Diesem Resultat ging eine langsame Erforschung der chemischen Eigenschaften der Radioelemente voraus, und da ihre Entwicklung bis jetzt noch nirgends eine gebührende Darstellung gefunden hat, wurde sie ausführlich im Kapitel III geschildert. Die Erscheinung der chemischen Untrennbarkeit isotoper Elemente, die nicht nur für die Radiochemie, sondern auch für die allgemeine Chemie eine grundlegende Bedeutung besitzt, wurde dabei besonders berücksichtigt.

Die Aufklärung des im Kapitel IV dargestellten Verhältnisses der zahlreichen Radioelemente zum periodischen System änderte nichts an der früheren Ansicht, daß die Zahl der qualitativ chemisch verschiedenen Elemente durch die Zahl der Stellen des Systems erschöpft wird; sie fügte aber dazu die neue Erkenntnis, daß wenigstens in dem vom Uran bis Thallium reichenden Teil des Systems eine solche Stelle der Sammelplatz einer ganzen Gruppe — Plejade — von Elementen sein kann, die zwar untereinander keine (wenigstens bis jetzt) nachweisbaren Unterschiede in ihren chemischen Eigenschaften zeigen, aber im Atomgewicht und Lebensdauer (auch anderen radioaktiven Eigenschaften) beträchtliche Unterschiede aufweisen können. Diese vielen Elemente stehen auch nicht mehr zusammenhanglos im System da, sondern sie sind durch die genetischen Beziehungen verknüpft, die das Studium der radioaktiven Umwandlungen aufgedeckt hat. Es besteht dabei ein überaus einfacher durch die im Kapitel V besprochenen Verschiebungssätze gegebener Zusammenhang zwischen der Art (α oder β) einer Umwandlung und der relativen Stellung im System der durch sie verbundenen Elemente.

Es konnte weiterhin gezeigt werden, daß, obwohl im radioaktiven Teil eine Stelle des Systems Elemente mit weit auseinanderliegenden Atomgewichten aufweist, auch hier die sonst bestehende Regelmäßigkeit in der Änderung des Atomgewichtes von Stelle zu Stelle zu verzeichnen ist, wenn man nur die langlebigsten Glieder der Plejaden betrachtet. Dies wäre kaum zu erwarten, wenn nicht innerhalb der Plejaden die Lebensdauer vom Atomgewicht abhängen würde, und wie das Kapitel VI zeigt, besteht in der Tat eine derartige Abhängigkeit. Dadurch gewinnt der Begriff der Lebensdauer auch für das Verständnis des periodischen Systems eine Bedeutung.

1) Näheres vgl. (1) u. (2) und neueste Jahrgänge dieser Zeitschrift, Jahrb. d. Radioaktivität u. Elektronik, Wien. Ber., Phil. Mag., Le Radium.

Tabelle 1.

Uran-Radiumreihe (Bezeichnung der Elemente, Art und Eigenschaften[1]) der Strahlen)	Gruppe d. period. Systems	Ordnungszahl	Thoriumreihe (Bezeichnung der Elemente, Art u. Eigenschaften[1]) der Strahlen)	Gruppe d. period. Systems	Ordnungszahl	Aktiniumreihe (Bezeichnung der Elemente, Art und Eigenschaften[1]) der Strahlen)
Uran I	IVa	92				? (Glied der Uran-Radiumreihe)
↓ α 2,50 cm						↓
Uran X_1	IVa	90				?
↓ β 500 cm^{-1}			Thorium	IVa	90	↓
Uran X_2 (Brevium)	Va	91	↓ α 2,72 cm			?
↓ β 16 cm^{-1}, γ 0,13 cm^{-1} α (?)			Mesothorium 1	IIa	88	↓
Uran 2 α (?)	VIa	92	↓ (β)			Aktinium
Uran Y	IVa	90	Mesothorium 2	IIIa	89	↓
↓ α 2,90 cm β ? 300 cm^{-1}			↓ β 20–38 cm^{-1}, γ 26 | 0,116 | cm^{-1}			↓ (β)
Ionium	IVa	90	Radiothorium β (sehr weich)	IVa	90	Radioaktinium α 4,6 cm, β (weich), γ
↓ α 3,05 cm			↓ α 3,87 cm			↓ α 4,2 cm
Radium β 200 cm^{-1}	IIa	88	Thorium X (β?)	IIa	88	Aktinium X (β?)
↓ α 3,30 cm			↓ α 4,3 cm			↓ α 4,3 cm
Radiumemanation	0 (VIII)	86	Thoriumemanation	0 (VIII)	86	Aktiniumemanation
↓ α 4,16 cm			↓ α 5,0 cm			↓ α 6,4 cm
Radium A	VIb	84	Thorium A	(VIb)	(84)	Aktinium A
↓ α 4,75 cm			↓ α 5,7 cm			↓ α 6,4 cm
Radium B	IVb	82	Thorium B	IVb	82	Aktinium B
↓ β 80 | 13 | cm^{-1}, γ 230 | 40 | 0,51 | cm^{-1}			↓ β 110 cm^{-1}, γ 160 | 32 | 0,36 | cm^{-1}			↓ β weich, γ 120 | 31 | 0,45 | cm^{-1}
Radium C_1	Vb	83	Thorium C_1	Vb	83	Aktinium C_1
99,97 Proz. α 0,03 Proz. Radium C_2	(IIIb)	(81)	65 Proz. α 4,8 cm 35 Proz. Thorium D	IIIb	81	0,15 Proz. α 5,3 cm 99,85 Proz. Aktinium D
↓ β 13 | 53 | cm^{-1}, γ 0,115 cm^{-1}			↓ β 13,5 cm^{-1}			↓ (β) β 28,5 cm^{-1} γ 0,198 cm^{-1}
Radium C' β 13 cm^{-1} (γ ?)	(VIb)	(84)	Thorium C_2 β 21,5 cm^{-1} γ 0,096 cm^{-1}	(VIb)	(84)	Aktinium C_2
↓ α 6,94 cm			↓ α 8,60 cm			↓ α 6,4 cm
Radium D	IVb	82	Thorium D_2 (Thoriumblei)	IVb	82	Aktinium D_2 (Aktiniumblei)
↓ β 5500 cm^{-1}, γ 45 | 0,99 | cm^{-1}			↓ (β)			
Radium E	Vb	83	?			
↓ β 44 cm^{-1}, γ						
Radium F (Polonium)	VIb	84				
↓ α 3,80 cm						
Radium G (Radiumblei)	IVb	82				

1) Bei α-Strahlen Reichweite in Luft (760 mm, 15°), bei β- und γ-Strahlen Absorptionskoeffizient in Aluminium. Die Atomgewichte und Halbwertszeiten der Elemente sind in Tabelle 2 angegeben.

Während das bisher Besprochene eine Erweiterung und Vertiefung unserer Kenntnisse der Beziehungen zwischen den Elementen bedeutet, ist in einer Hinsicht eine prinzipielle Änderung der Ansichten nötig geworden. Die Existenz von Elementen mit gleichen Eigenschaften und verschiedenem Atomgewicht — die isotopen Bleisorten (Kapitel VII) sind der erste auf gewöhnlichem chemischen Wege erbrachte Beweis dafür — zeigt überzeugend, daß das Atomgewicht unmöglich eindeutig die Eigenschaften der Elemente bestimmen kann und auch nicht als einzige Grundlage der Systematik der Elemente dienen kann. Einen Ersatz für das seiner dominierenden Stellung beraubte Atomgewicht brachten die neuen Ansichten über die Struktur der Atome, die im Kapitel VIII behandelt werden. Es ist dabei nicht beabsichtigt, diese noch unter regster Diskussion stehende Frage zu erschöpfen, es werden nur die Grundvorstellungen des Rutherford-Bohrschen Atommodells besprochen, das für das Verständnis des periodischen Systems tiefe Einblicke ergab, indem es an Stelle des Atomgewichts die positive Ladung des Atomkernes als diejenige Eigenschaft einsetzte, von der in erster Linie die meisten anderen abhängen. Die Kernladung wächst beim Übergang von Stelle zu Stelle des periodischen Systems je um ein Elementarquantum und ist bei Isotopen gleich.

Neben der Kernladung wird aber auch die Masse des Atoms einen gewissen Einfluß auf viele Eigenschaften der Elemente ausüben, und der physiko-chemischen Forschung erwächst die wichtige Aufgabe, die Abhängigkeit der Eigenschaften der Elemente einerseits von der Kernladung, andererseits vom Atomgewicht zu ergründen. Den isotopen Elementen wird dabei eine besonders große Rolle zukommen, da in ihnen der einfache Fall verwirklicht ist, wo die Kernladung gleich ist und nur das Atomgewicht verschieden. Im Kapitel IX sind die bisherigen allerdings noch nicht zahlreichen Resultate, die das theoretische und experimentelle Studium der Eigenschaften der Isotopen für die Beurteilung dieser Frage ergeben hat, behandelt.

Es wäre von großem Interesse, in diesem Zusammenhang auch die Verwendung der isotopen Elemente für das Studium der Physik und Chemie unendlich dünner Schichten und äußerster Verdünnungen zu besprechen, ferner das Verhalten der Gemische von Isotopen u. a. m., wenn auch diese Probleme nur in losem Zusammenhang mit dem Hauptthema des Berichtes stehen. Die aus Raummangel nötig gewordene Weglassung dieser Fragen wurde dadurch erleichtert, daß sie vor kurzem eine zusammenfassende Darstellung erfahren haben[1]).

Im letzten Kapitel (X) sind die Konsequenzen besprochen, die die neuen Erfahrungen und Theorien für das Verständnis auch des nichtradioaktiven Teiles des Systems ergeben haben, und es wird dabei auch eine entsprechende Darstellungsform des Systems vorgeschlagen.

II. Atomgewichte der Radioelemente.

Bei den Radioelementen ist die experimentelle Bestimmung des Atomgewichtes nur in den allerwenigsten Fällen durchführbar gewesen, jedoch bieten die genetischen Beziehungen zwischen den Radioelementen die Möglichkeit, ihre Atomgewichte aus denen ihrer Vorfahren oder Abkömmlinge zu berechnen.

Emittiert das Atom eines Elementes bei seiner Umwandlung ein α-Teilchen, so sollte das Atomgewicht des dabei entstehenden Elementes um das Atomgewicht des Heliums (4,00[2])) kleiner werden als das des ursprünglichen. Nach Umwandlungen, bei welchen nur β-Teilchen, d. h. negative Elektronen emittiert werden, ist dagegen keine Atomgewichtsveränderung zu erwarten[3]).

Es ist weiterhin wegen der beträchtlichen Energieveränderung bei einer radioaktiven Umwandlung eine kleine Atomgewichtsverminderung zu erwarten[4]), die für die verschiedenen α-Umwandlungen zwischen 0,004 und 0,01 Einheiten des Atomgewichtes beträgt und für β-Umwandlungen noch etwa zehnmal kleiner ist. Sie kommt also praktisch nur bei sehr genauem Vergleich weit entfernter Glieder der Umwandlungsreihen in Betracht.

Daß diese Berechnungsweise der Atomgewichte mit beträchtlicher Annäherung richtige Resultate ergibt, lehrt der Vergleich der Atomgewichte des Urans und Radiums. Es muß dabei erwähnt werden, daß das chemisch unzerlegbare Element Uran, das für die Atomgewichtsbestimmungen benutzt wird, ein Gemisch zweier Elemente Uran 1 (U_1) und Uran 2 (U_2) vorstellt[5]), deren Atomgewichte

1) F. Paneth, Jahrb. d. Radioakt. u. Elektron. **11** 451, 1914.

2) Die Masse des α-Teilchens ist auf Grund der Bestimmung des $\frac{E}{M}$ (E. Rutherford u. H. Robinson, Wien. Ber. **122** (IIa), 1855, 1913) bezogen auf $O = 16$ gleich 4,005, während die neueste Dichtebestimmung des Heliums (W. Heuse, Ber. d. D. phys. Ges. **15**, 518, 1913) für dessen Atomgewicht den Wert 4,002 lieferte.

3) (15) S. 431.

4) R. Swinne, diese Zeitschr. **14**, 145, 1913.

5) (1) S. 396.

nach dem Schema der Tabelle 1 und dem Obigen um 4,0 Einheiten sich unterscheiden. Da jedoch U_2 viel kurzlebiger ist als U_1, ist die Menge des ersteren im Gemisch so klein, daß es erst die dritte oder höchstens die zweite Dezimale des Atomgewichtes des Urans beeinflussen kann. Der experimentelle Wert entspricht also mit beträchtlicher Annäherung dem Atomgewicht des U_1.

Geht man nun vom Atomgewicht des Radiums aus, das auf Grund der sorgfältigen Untersuchung von O. Hönigschmid[1]) 225,97 beträgt, und berücksichtigt man, daß vom U_1 zum Radium drei α-Umwandlungen und zwei β-Umwandlungen führen, was einem Atomgewichtsunterschied 12,00 entspricht, und daß weiterhin wegen des Energieverlustes bei diesen Umwandlungen eine Abnahme im Atomgewicht um ca. 0,02 Einheiten zu erwarten ist, so erhält man für das theoretische Atomgewicht des U_1 den Wert 237,99. Nach der Neubestimmung dieser Konstante durch O. Hönigschmid[2]) liegt ihr Wert zwischen 238,08 und 238,18. Es besteht also eine sehr angenäherte Übereinstimmung zwischen diesem Resultat und dem theoretischen Wert, wenn auch eine Abweichung nicht zu verkennen ist. Ob letztere auf kleine Unsicherheiten der experimentellen Werte zurückzuführen ist, oder auf Beimengung unbekannter isotoper Elemente im Uran oder Radium, oder ob schließlich noch unaufgeklärte Ursachen eine kleine Atomgewichtsveränderung bedingen, läßt sich vorerst nicht entscheiden.

Die in der Tabelle 2 angegebenen Atomgewichte der Elemente der Uran-Radiumreihe sind aus dem Atomgewicht des Radiums, die der Glieder der Thoriumreihe aus dem Atomgewicht des Thoriums (232,15[3]) auf die erwähnte Weise auf Grund der Schemata der Tabelle 1 berechnet worden und auf ganze Zahlen abgerundet.

Leider ist das Atomgewicht keines der Glieder der Aktiniumreihe mit genügender Sicherheit bekannt, um als Ausgangspunkt für diese Berechnungsweise zu dienen. Der in Tabelle 2 für das Atomgewicht des Aktiniums gewählte hypothetische Wert 227 wird in Kapitel VI begründet.

Wie die Tabelle 2 lehrt, liegen die Atomgewichte der 36 bekannten Radioelemente zwischen den Werten 238 und 207, also in einem Intervall, dem im periodischen System (vgl. Tabelle 3) die wenigen Stellen zwischen Uran und Thallium entsprechen. Da dazu von diesen Stellen ein Teil schon vor der Entdeckung der Radioaktivität durch die Elemente *U*, *Th*, *Bi*, *Pb* besetzt war, so ist man frühzeitig zu der Überzeugung gekommen, daß es unmöglich ist, jedem der neuen Elemente einen eigenen Platz im System zuzuweisen. Wir werden später die ersten Versuche zur Aufklärung dieser Schwierigkeit erwähnen, jetzt sei der Weg verfolgt, der zur Lösung der Frage geführt hat und der die chemischen Eigenschaften der Radioelemente zum Ausgangspunkt hat.

III. Die chemischen Eigenschaften der Radioelemente.

A. Allgemeines.

Die Erforschung der chemischen Eigenschaften der meisten Radioelemente begegnete der Schwierigkeit, daß es nicht möglich ist, sie in reinem Zustande zu isolieren. Außer den Elementen Uran und Thorium wurde nur noch das Radium und die Radiumemanation (*Ra Em*) in genügenden Mengen in reinem Zustande dargestellt, um die Untersuchung der chemischen und spektroskopischen Eigenschaften und des Atomgewichts zu ermöglichen[1]). Das Radium erwies sich dabei bekanntlich dem Barium chemisch sehr ähnlich, und seine Salze lassen sich nur durch fraktionierte Kristallisation oder Fällung von den entsprechenden Bariumsalzen trennen. Dem Radium wurde deshalb die vor seiner Entdeckung freie Stelle in der zweiten Gruppe und der letzten Horizontalreihe des periodischen Systems zugewiesen. Das Atomgewicht des Radiums steht damit in bester Übereinstimmung. Die Radiumemanation erwies sich auf Grund ihrer Unfähigkeit, Verbindungen mit anderen Elementen einzugehen, als ein Element der Edelgasgruppe[2]). Ihr Atomgewicht berechnet sich theoretisch zu 222,0, was in guter Übereinstimmung mit den aus Effusionsversuchen bzw. aus der Dichtebestimmung folgenden Werten[3]) steht und keinen Zweifel läßt, daß der Emanation die Stelle in der nullten Gruppe und der letzten Horizontalreihe des Systems zukommt.

Bei den übrigen Radioelementen mußte sich

1) Wien. Ber. **121** (IIa), 1973, 1912.
2) Wien. Ber. **123** (IIa), 1635, 1914.
3) O. Hönigschmid, Chemiker-Ztg. **39**, 806, 1915.

1) Neuerdings ist es gelungen, das Radium *D* durch Zerfall von Radiumemanation in genügender Menge zu erhalten, um sein elektrochemisches Potential zu bestimmen. (G. v. Heyesy und F. Paneth, diese Zeitschr. **15**, 797, 1914.)

2) Dasselbe gilt für die kurzlebigen Thorium- und Aktiniumemanationen.

3) Nach A. Debierne 220 ± 2—3 Proz. (C. R. **150**, 1740, 1910; nach R. W. Gray und W. Ramsay 223 ± 1—2 Proz. (Jahrb. d. Radioakt. u. Elektronik **8**, 5, 1911).

die Untersuchung ihrer Chemie notgedrungen auf ihr Verhalten bei chemischen Reaktionen anderer in wägbaren Mengen beigemischter Elemente beschränken. Bei der Deutung der auf diesem Wege ermittelten Tatsachen stieß man jedoch auf das schwerwiegende Bedenken, ob man aus dem Verhalten der Radioelemente, das sie in winzigen Mengen zeigen, Rückschlüsse auf ihre wahren chemischen Eigenschaften, die sie in wägbaren Mengen aufweisen würden, ziehen darf.

Diese von vielen Autoren geäußerten Bedenken, so begründet sie auch erscheinen mußten, erwiesen sich aber auf Grund der neuesten Entwicklung[1]) als unberechtigt. Man muß somit die älteren Versuche zur Charakterisierung der chemischen Natur der fast gleichzeitig mit dem Radium entdeckten Elemente Polonium und Aktinium, bei denen obige Bedenken nicht berücksichtigt wurden, als die ersten erfolgreichen Beiträge zur Chemie der in reinem Zustande unzugänglichen Radioelemente ansehen.

B. Polonium (Radium *F*).

Das Polonium (*Po*) ist von seiner Entdeckerin Frau Curie[2]) aus der Pechblende als Begleiter von Wismut (*Bi*) gewonnen worden, und es ist ihr auch schon eine teilweise Trennung des *Po* vom *Bi* gelungen. Die chemische Verschiedenheit der beiden Elemente bewies besonders überzeugend W. Marckwald[3]): nach ihm läßt sich *Po* vom *Bi* praktisch vollständig trennen, z. B. durch elektrochemische Abscheidung des *Po* auf metallischem *Bi*, das in die gemeinsame Lösung der beiden Elemente eingetaucht wird, woraus folgt, daß das *Po* elektrochemisch edler ist als *Bi*[4]) und somit ein stark elektronegatives Metall vorstellen muß. *Po* ist aber positiver als Tellur, denn während dieses durch Hydrazinhydrat zu Metall reduzierbar ist, bleibt *Po* dabei in Lösung. In bester Übereinstimmung mit diesen und anderen Tatsachen steht die zuerst von Marckwald[5]) ausgesprochene Ansicht, daß dem *Po* im periodischen System die früher freie Stelle in der Schwefel-Selen-Tellurgruppe rechts neben *Bi* zukommt. Das berechnete Atomgewicht des *Po* (210,0) stand damit auch im Einklang.

C. Aktinium (*Ac*).

Die Kenntnis der chemischen Eigenschaften des *Ac*[1]) verdankt man hauptsächlich den Untersuchungen von F. Giesel[2]) der dieses Element aus Pechblenderückständen mit den Ceriterden abgeschieden hat. Von den Ceriterden (*La, Ce, Nd, Pr, Sm, Eu*) scheint es am nächsten dem Lanthan zu stehen, dem es bei den meisten Fraktionierungen folgt. Aber auch vom Lanthan läßt es sich trennen, z. B. durch fraktionierte Kristallisation der Magnesium[3])- oder der Mangan[4])-Doppelhydrate. Diesen Eigenschaften entspricht gut die allgemeine Ansicht, daß dem *Ac* die vorher freie Stelle in der dritten Gruppe und der letzten Horizontalreihe des Systems zukommt. Der Befund von G. v. Hevesy[5]), daß *Ac* in Lösungen dreiwertige Ionen bildet, steht damit im besten Einklang. Das Atomgewicht des *Ac* ist ja nicht mit Sicherheit bekannt, der zu ca. 227 hypothetisch angenommene Wert (vgl. Kapitel VI) läßt sich jedoch mit dieser Stellung im System auch vereinbaren.

D. Chemisch untrennbare Elemente.

Die Untersuchung von Radium, Radiumemanation, Polonium und Aktinium führte zu dem Resultat, daß sie Elemente mit neuen chemischen Eigenschaften vorstellen, und ihre Einreihung in das periodische System ließ sich, wie wir sahen, leicht durchführen. Ihnen an die Seite kann auch das vor kurzem entdeckte Brevium, von dem noch später die Rede sein wird, gestellt werden. Die Untersuchung aller übrigen Radioelemente führte indessen zu dem in der Chemie völlig neuen Resultat, daß sie von manchen gewöhnlichen oder radioaktiven Elementen auf chemischem Wege nicht getrennt werden können.

1. Radiothorium (*RdTh*) und Thorium (*Th*). Zum erstenmal kam diese Untrennbarkeit deutlich zum Vorschein im Jahre 1907 bei der Untersuchung des *RdTh*. B. Boltwood[6]) hat zuerst auf die Ähnlichkeit im chemischen Verhalten des *RdTh* und *Th* hingewiesen. Fast gleichzeitig teilten H. Mc Coy und W. Roß[7])

1) Vgl. K. Fajans und P. Beer, Ber. d. D. chem. Ges. **46**, 3486, 1913; F. Paneth, Jahrb. d. Radioakt. u. Elektronik 11, 451, 1914.
2) C. R. **127**, 175, 1898.
3) Ber. d. D. chem. Ges. **35**, 2285, 4239, 1902; **36**, 2662, 1903; **38**, 591, 1905.
4) Nach neuen Versuchen von G. v. Hevesy und F. Paneth (Wien. Ber. **123** (IIa), 1619, 1914) beträgt das Normalpotential des Poloniums $E_c = +0{,}57$, was damit in guter Übereinstimmung steht.
5) Diese Zeitschr. **4**, 51, 1902.

1) Über den Anteil von Debierne (C. R. **130**, 906 u. **131**, 333, 1900) bzw. von F. Giesel an der Entdeckung des jetzt unter dem Namen Aktinium bekannten Elementes vgl. (1) S. 17 u. 464; B. Boltwood, Am. Journ. Science **25**, 365, 1908.
2) Ber. d. D. chem. Ges. **36**, 342, 1903; **38**, 775, 1905.
3) Giesel, ebenda **38**, 2336, 1905.
4) A. Debierne, C. R. **139**, 538, 1904.
5) Diese Zeitschr. **14**, 1205, 1913.
6) Am. Journ. Science **24**, 99, 1907.
7) Journ. Am. Chem. Soc. **29**, 1709, 1907.

sehr gründliche Versuche mit, aus denen hervorging, daß es durch fraktionierte Fällungen der *Th-RdTh*-Salze oder durch deren vielmals (bis 100) wiederholte Fällung und Auflösen nicht möglich ist, das Mischungsverhältnis der zwei Elemente merklich zu verschieben. So war z. B. bei der Fällung des *Th-RdTh* als Oxalat in 8 Fraktionen die Aktivität der Gewichtseinheit der ersten Fraktion innerhalb von 1 Proz. gleich der der letzten.

2. Ionium (*Io*), Uran X_1 (UX_1) und Thorium. Im gleichen Jahre berichten B. Boltwood[1]) und kurz darauf W. Marckwald und B. Keetman[2]), daß es ihnen nicht gelungen ist, das *Io* von *Th* zu trennen. B. Keetman[3]) führte dann eine sehr große Reihe fraktionierter Fällungen, Kristallisationen und eine fraktionierte Sublimation verschiedener Verbindungen von *Io-Th*-Gemischen aus, ohne ihr Mischungsverhältnis merklich verändern zu können. Ebenso erfolglos waren die Trennungsversuche, die C. Auer v. Welsbach[4]) an diesem Elementenpaar ausgeführt hat. Keetman berichtet, daß auch das UX_1 vom *Th* untrennbar ist, was später von A. Fleck (9) durch ausführliche Versuche bestätigt wurde.

Daß man es in diesen und ähnlichen Fällen mit einer neuartigen Erscheinung zu tun hat, haben zuerst D. Strömholm und The Svedberg zum Ausdruck gebracht.

3. Thorium *X* (*ThX*), Aktinium *X* (*AcX*) und Radium. Strömholm und The Svedberg[5]) fanden, daß *ThX* und *AcX* ähnlich wie *Ra* besonders leicht mit Bariumsalzen kristallisiert und ausfällt, was auf Isomorphismus der entsprechenden Salze dieser Radioelemente und des Bariums hindeutete und für die chemische Analogie zwischen den Elementen sprach. Weiterhin zeigten diese Autoren, daß, wenn man Bariumnitrat oder Bariumchlorid aus Lösungen von *Ra* bzw. *ThX* oder *AcX* unter gleichen Bedingungen kristallisieren läßt, das Verhältnis, in dem sich die drei Radioelemente zwischen die Kristalle und die Mutterlauge verteilen, gleich ist. Daraus folgte, daß die Salze von *Ra*, *ThX* und *AcX* nicht nur ähnliche Isomorphieverhältnisse aufweisen, sondern daß ihre Löslichkeit sogar gleich ist.

Strömholm und Svedberg wiesen darauf hin, daß diesen drei chemisch so ähnlichen Elementen (*Ra*, *ThX*, *AcX*) analoge Stellen in den Umwandlungsreihen zukommen: sie sind die direkten Muttersubstanzen der entsprechenden Emanationen, die ebenfalls chemisch einander völlig gleichen, da sie ja alle Edelgase vorstellen. Aber auch die Muttersubstanzen von *Ra*, *ThX* und *AcX* entsprechen sich chemisch: *Io* und *RdTh* sind ja beide von *Th* untrennbar und für Radioaktinium (*RdAc*) wiesen Strömholm und Svedberg nach, daß es ebenfalls mit *Th* kristallisiert. Man muß nun diesen Triaden je eine gemeinsame Stelle im periodischen System zuweisen, wobei also auf jede Stelle je ein Element der drei Reihen käme. Die Zuordnung mehrerer Elemente mit merklich verschiedenen Atomgewichten zu einer Stelle des periodischen Systems stand natürlich im Widerspruch mit dem üblichen Einreihungsprinzip, und Strömholm und The Svedberg suchten auf folgende Weise diesen Widerspruch zu erklären: „Man könnte sich vorstellen, daß die genetischen Reihen durch das periodische System hinab sich fortsetzen, aber daß immer drei Elemente der verschiedenen genetischen Reihen, welche also zusammen im periodischen System einen Platz einnehmen, in ihren chemischen Eigenschaften so gleich sind, daß sie in der Natur immer zusammen vorkommen und auch im Laboratorium nicht haben merklich getrennt werden können. Vielleicht könnte man als eine Andeutung in dieser Richtung die Tatsache ansehen, daß das Mendelejeffsche System nur eine ungefähre Regel betreffend die Atomgewichte gibt, aber die Exaktheit eines Naturgesetzes nicht besitzt. Dies wäre ja nicht auffallend, wenn die Elemente des Schemas Gemische von mehreren gleichartigen Elementen von ähnlichen, aber nicht völlig identischen Atomgewichten wären. In der Tat haben wir auch bei den drei zusammengehörigen Elementen Radium, Aktinium *X* und Thorium *X* keine Verschiedenheiten in den chemischen Verhältnissen, auch nicht in quantitativer Hinsicht auffinden können." Es ist auffallend, wie nahe diese Auffassung den neuesten Ansichten in dieser Frage entspricht. Wenn trotzdem dieser Versuch, das Verhältnis der Radioelemente zum periodischen System aufzuklären, zunächst so wenig Beachtung gefunden hat und auch wenig bekannt geworden ist[1]), so liegt das wohl daran, daß die Untersuchung von Strömholm und The Svedberg nur wenig Radioelemente umfaßte und daß sie in bezug auf die chemische Natur einiger Elemente (z. B. Mesothorium 1) Ansichten äußerten, die die spätere Forschung nicht bestätigt hat.

1) Am. Journ. Science **25**, 365, 1908.
2) Ber. d. D. chem. Ges. **41**, 49, 1908.
3) Jahrb. d. Radioakt. u. Elektronik **6**, 265, 1909.
4) Wien. Ber. **119**, (IIa), 1042, 1910.
5) Zeitschr. f. anorg. Chem. **61**, 338 u. **63**, 197, 1909.

1) So sind auch dem Verfasser während der Abfassung seiner ersten Arbeiten (6 und 7) diese Ausführungen unbekannt gewesen und er hat erst nachträglich (7 S. 432) auf sie hinweisen können.

4. Mesothorium 1 ($MsTh_1$) und Radium. Während schon B. Boltwood[1]) auf die Ähnlichkeit im chemischen Verhalten des $MsTh_1$ und ThX hingewiesen hat, haben erst die Arbeiten von W. Marckwald[2]) und F. Soddy[3]) volle Klarheit über die Chemie dieses Elementes gebracht. Ersterer berichtet, daß es ihm trotz vieler Versuche nicht gelungen ist, das $MsTh_1$ vom Ra zu trennen, und er stellte diese Beobachtungen in Parallele zu den erfolglosen Versuchen, das $RdTh$ oder Io von Th zu trennen.

Auch Soddys Versuche, eine Trennung des $MsTh_1$ von Ra zu erzielen, sind fehlgeschlagen. Er führte eine große Reihe von fraktionierten Kristallisationen von Mesothorium- und Radiumhaltigem Bariumchlorid aus. Während es mit Leichtigkeit gelingt, auf diesem Wege sowohl das Ra als auch das $MsTh_1$ vom Ba zu trennen, bleibt das Mischungsverhältnis des $MsTh_1$ zu Ra, wie die radioaktive Analyse ergab, innerhalb der Messungsfehler vollkommen konstant, also auch das $MsTh_1$ ist dem ThX und AcX wegen der weitgehenden chemischen Gleichheit mit Ra an die Seite zu stellen.

Soddy wies auch darauf hin, daß diese Untrennbarkeit der Radioelemente nicht verwechselt werden darf mit der Schwierigkeit der Trennung der Elemente der seltenen Erden, sondern daß man es hier mit Elementen zu tun hat, die in chemischer Hinsicht praktisch identisch sind. Diese Auffassung hat Soddy auch in seinem im Jahre 1911 erschienenen Buche (2) vertreten.

5. Radium D (RaD) und Blei. RaD wird aus Uranmineralien mit Blei abgeschieden und bildet mit seinen Umwandlungsprodukten RaE und F die radioaktiven Bestandteile des sogenannten „Radiobleis". Daß RaD das Blei bei vielen chemischen Reaktionen begleitet, wußte man frühzeitig. Es wurden zwar einige Trennungsmethoden angegeben[4]), was aber bei genauerer Nachprüfung nicht bestätigt wurde[5]). Versuche von B. Szilard[5]), H. Herschfinkel[6]) und besonders von F. Paneth und G. v. Hevesy[7]) zeigten, daß man es beim RaD und Blei mit einem chemisch untrennbaren Elementenpaar zu tun hat.

6. Uran 2 und Uran 1. Auf Grund der Strahlungsverhältnisse des Urans hat man geschlossen[1]), daß Uran zwei radioaktive Bestandteile U_1 und U_2 enthält. Da aber die Versuche, das Uran in zwei Bestandteile auf chemischem Wege[2]) oder durch Diffusion in Lösungen[3]) zu zerlegen, fehlgeschlagen sind, so muß angenommen werden, daß das U_2 vom U_1 untrennbar ist.

7. Die übrigen Radioelemente. Während es sich bei der bis jetzt geschilderten Entwicklung der Chemie der Radioelemente um ein langsames und allmähliches Vordringen handelt, bei dem das Verhalten weniger als der Hälfte aller Elemente untersucht wurde, ist am Anfange des Jahres 1913 mit einem Schlage nicht nur das chemische Verhalten aller anderen Radioelemente, sondern auch ihr Verhältnis zum periodischen System restlos aufgeklärt worden. Zu diesem Ergebnis haben beigetragen: A. Fleck, A. S. Russell, K. Fajans und seine Mitarbeiter P. Beer und O. Göhring, F. Soddy und W. Metzener[4]).

Die theoretische Seite der Frage wird in den nächsten Kapiteln besprochen, hier seien die experimentellen Resultate, die hauptsächlich A. Fleck (9) zu verdanken sind, angeführt. Es zeigte sich, daß mit Ausnahme des Uran X_2 sämtliche der neu untersuchten Radioelemente von einem der folgenden Elemente: Thorium, Aktinium, Polonium,

1) Am. Journ. Science **24**, 99, 1907.
2) Ber. d. D. chem. Ges. **43**, 3420, 1910.
3) Journ. Chem. Soc. **99**, 72, 1911.
4) K. A. Hofmann und V. Wölfl, Ber. d. D. chem. Ges. **40**, 2425, 1907.
5) B. Szilard, Le Radium **5**, 1, 1908; Ch. Staehling, C. R. **157**, 1430, 1913.
6) Le Radium **7**, 198, 1910.
7) Wien. Ber. **122** (IIa), 993, 1913.

1) (1) S. 396.
2) M. Levin, diese Zeitschr. **7**, 692, 1906; H. McCoy und W. H. Roß, Journ. Am. Chem. Soc. **29**, 1698, 1907; B. Boltwood. Am. Journ. Science **25**, 269, 1908.
3) G. v. Hevesy u. L. v. Putnoky, diese Zeitschr. **14**, 63, 1913 und (2) Seite 69.
4) Die Beteiligung der einzelnen Autoren ist aus folgendem zu ersehen. Fleck untersuchte auf Anregung Soddys systematisch das chemische Verhalten vieler Radioelemente. Noch bevor seine Resultate publiziert worden sind (9), haben fast gleichzeitig Russell (5) und Fajans (6, 7) auf Grund der von ihnen aufgestellten, später (Kapitel V) zu besprechenden Regeln, die chemische Natur sämtlicher noch nach dieser Richtung nicht untersuchten Radioelemente theoretisch abgeleitet (in einigen Punkten unterschieden sich die Resultate von Russell und die von Fajans) und ihr Verhältnis zum periodischen System diskutiert. Fajans unternahm mit Beer und Göhring die experimentelle Prüfung der von ihm gezogenen Schlüsse, sie haben aber wegen der bald darauf erschienenen Arbeit von Fleck, die über die meisten Elemente Aufklärung brachte, ihre Versuche nur auf wenige Produkte ausgedehnt (vgl. Naturwissenschaften **1**, 338, 1913; Ber. d. D. chem. Ges. **46**, 3492, 1913; P. Beer, Dissertation Karlsruhe 1914; O. Göhring, Dissertation Karlsruhe 1914). Auch Metzener (Ber. d. D. chem. Ges. **46**, 979, 1913) untersuchte zur Entscheidung zwischen den Ansichten von Fajans und den wesentlich davon abweichenden von G. v. Hevesy (4) das chemische Verhalten einiger Elemente. Kurz nach dem Erscheinen der Arbeiten von v. Hevesy, Russell und Fajans hat Soddy (8) die ganze Frage diskutiert, wobei sich seine theoretischen Ausführungen, die er vor Kenntnisnahme der Arbeit von Fajans skizziert hat, fast vollkommen mit denen des letzteren deckten und durch die experimentellen Resultate von Fleck gestützt wurden.

Tabelle 2.

Atomgewichte	0 (VIII)	I a	I b	II a	II b	III a	III b	IV a	IV b	V a	V b	VI a	VI b	VII a	VII b	Atomgewichte
197			**Au**													197
200					**Hg**											200
204							**Tl**									204
206									RaG							206
207							βAcD 4,7 m		(AcD$_2$) **Pb**							207
208							βThD 3,1 m		(β)ThD$_2$ (10^6 a)		**Bi**					208
210							βRaC$_2$ 1,4 m		βRaD 16 a		βRaE 5 d		**αRaF** 136 d			210
(211)									βAcB 36 m		$\alpha_1\beta$AcC$_1$ 2,15 m		αAcC$_2$ (0,005 s)			(211)
212									βThB 10,6 h		$\alpha_1\beta$ThC$_1$ 60 m		αThC$_2$ (10^{-11} s)			212
214									βRaB 27 m		$\alpha_1\beta$RaC$_1$ 19,5 m		αRaC′ (10^{-6} s)			214
(215)													**αAcA** 0,002 s			(215)
216													αThA 0,14 s		—	216
218													αRaA 3 m			218
(219)	αAcEm 3,9 s															(219)
220	αThEm 54 s															220
222	**αRaEm** 3,85 d															222
(223)				αAcX 11,5 d												(223)
224			—	αThX 3,7 d												224
226				**αRa** 1750 a												226
(227)						(β) **Ac** (30 a)		αRdAc 19,5 d								(227)
228				(β)MsTh$_1$ 5,5 a		βMsTh$_2$ 6,2 h		αRdTh 2 a								228
230								αIo 10^5 a								230
232								α**Th** $1{,}5 \cdot 10^{10}$ a								232
234								βUX$_1$ 24,6 d		**UX$_2$** 1,15 m		αU$_2$ ($2 \cdot 10^6$ a)				234
238												α**U$_1$** $5 \cdot 10^9$ a				238

Die Zeitangaben bedeuten die Halbwertszeiten der Elemente, die Symbole α und β geben die Art der Umwandlung an, der die Elemente unterliegen (vgl. Kapitel V, 2e).

Wismut, Blei und Thallium, untrennbar sind. Diese Resultate vereinigt mit den schon früher besprochenen Ergebnissen werden wiedergegeben durch Tabelle 2[1]). Die untrennbaren Elemente sind in der Tabelle jeweils an einer Stelle des periodischen Systems vereinigt. So befinden sich an der Stelle, wo in der üblichen Tabelle Uran steht (Gruppe VIa), 2 Elemente, nämlich U_1 und U_2, an der Stelle des Bleies (*Pb*) sogar 7 Elemente. Mit Ausnahme von *ThA*, *AcA*, *RaC'*, ThC_2, AcC_2 und RaC_2, deren Kurzlebigkeit eine chemische Untersuchung unmöglich macht (Kapitel V, 2, b und c), ist die Untrennbarkeit auf experimentellem Wege festgestellt worden. Es wurde dabei in der Weise verfahren, daß das betr. gewöhnliche Element mit dem Radioelement vermischt wurde und dann gezeigt, daß sie bei allen chemischen Operationen beisammen bleiben. In den meisten Fällen wurde außerdem noch nachgewiesen, daß auch durch fraktionierte Fällung, Kristallisation, Verdampfung oder elektrochemische Abscheidung keine Verschiebung des Mischungsverhältnisses erreicht werden kann: die durch die Aktivität bestimmte Menge des Radioelementes war pro Gewichtseinheit des gewöhnlichen Elementes innerhalb der Versuchsfehler in allen Fraktionen gleich. Die Untrennbarkeit des Mesothorium 2 ($MsTh_2$) und *Ac* wurde dadurch bewiesen, daß das Verhältnis ihrer radioaktiv gemessenen Mengen bei fraktionierten Fällungen eines beigemischten gewöhnlichen Elementes in allen Fraktionen gleich bleibt. Die chemische Natur des *RaA* ergibt sich daraus, daß es von allen gewöhnlichen Elementen trennbar ist, dieselben Reaktionen wie *Po* zeigt und auch elektrochemisch diesem Element sehr nahe steht.

IV. Die Stellung der Radioelemente im periodischen System.

Der früher schon erwähnte Vorschlag von Strömholm und The Svedberg, die chemisch gleichen untrennbaren Elemente an einer Stelle des periodischen Systems zu setzen, stellt den ersten Versuch vor, die Radioelemente in das allgemeine System einzuordnen und er hat, wie wir gleich sehen werden, den Kern der Frage richtig getroffen. Alle späteren davon abweichenden Ansichten sind als ein Rückschritt zu betrachten. Es seien hier trotzdem einige kurz erwähnt, weil sie ein überaus klares Zeugnis dafür ablegen, wie tief bis vor kurzem die Überzeugung eingewurzelt war, daß die Stellung eines Elementes im System eindeutig von seinem Atomgewicht abhängt. Nur so läßt sich erklären, daß die durch β-Umwandlungen verknüpften Elemente wegen ihres gleichen Atomgewichtes nicht als verschiedene Elemente angesehen wurden, sondern als „allotrope"[1]) Formen desselben Elementes (Pseudoelemente), trotzdem schon frühzeitig bekannt war, daß solche Elemente nicht unbedeutende Unterschiede im elektrochemischen Verhalten zeigen. Es wurden somit entweder die β-Strahler bei der Einreihung ganz fortgelassen[2]), oder man hat den Elementen mit gleichem Atomgewicht die gleiche Stelle zugewiesen[3]).

In der Radiochemie von Soddy wurde indessen die Auffassung von Strömholm und The Svedberg akzeptiert, ohne sich jedoch zunächst allgemeine Geltung zu verschaffen[4]). Erst die Arbeiten von Russell (5) und namentlich die von Fajans (6, 7) und Soddy (8), denen wohl die endgültige Lösung der Frage gelungen ist, haben gezeigt, daß es einzig rationell ist, die chemisch untrennbaren Elemente an eine Stelle des Systems zu setzen.

Um richtig das Verhältnis der Radioelemente zum allgemeinen System beurteilen zu können, darf nicht vergessen werden, daß wir die Kenntnis der meisten Radioelemente ganz anderen Methoden verdanken, als die Kenntnis der gewöhnlichen Elemente. Ein neues gewöhnliches Element wird nur dann als solches erkannt, und seine chemischen Eigenschaften und Atomgewicht können nur dann bestimmt werden, wenn man es von anderen Elementen, mit denen es in der Natur gefunden wird, dank seinen besonderen chemischen oder physikalischen Eigenschaften trennen kann. Indessen ist die Auffindung einer neuen Halbwertszeit einer radioaktiven Strahlung, oder gar nur einer komplexen Strahlung, wie beim U_2, ein genügender Beweis für die Existenz eines neuen Radioelementes. Auch ist ja in den meisten Fällen für die Ermittlung des Atomgewichtes eines Radioelementes seine Isolierung in reinem Zustande gar nicht nötig, es genügt die Kenntnis seiner genetischen Beziehungen. In den radioaktiven Eigen-

1) Tabelle 2 wurde vom Verfasser (6) und dann von Soddy (8) inhaltlich identisch, der Form nach etwas verschieden aufgestellt.

1) W. Ramsay, Nature **87**, 285, 1911; E. Baur, Zeitschr. f. physikal. Chem. **76**, 582, 1911.

2) A. van den Broek, diese Zeitschr. **12**, 490, 1911; **14**, 32, 1913.

3) A. Cameron, Nature **82**, 67, 1909.

4) So findet man noch am Anfange des Jahres 1913 (4) die Auffassung, daß die Radioelemente Übergänge zwischen horizontal benachbarten Gliedern des periodischen Systems vorstellen.

schaften der Radioelemente besitzen wir also ein überaus ausgiebiges Mittel zur Erkennung neuer Elemente, und wie uns die Existenz der chemisch untrennbaren Elemente beweist, ist dieses Mittel auch viel feiner als die qualitative chemische Analyse, auf Grund welcher man ja z. B. das Gemisch von U_1 und U_2 bis vor kurzem als ein einheitliches chemisches Element (Uran) betrachtete. Es entspricht also durchaus dem bei Klassifizierung der gewöhnlichen Elemente eingeschlagenen Verfahren, wenn man die Gemische der untrennbaren Elemente als je ein Element betrachtet, dem nur eine Stelle im System zukommt. Es verschwindet dann die Schwierigkeit, die die Einreihung so vieler neuer Elemente lange Zeit bereitete, vollständig. Denn wie die Tabellen 1 und 2 zeigen, sind alle bekannten Radioelemente entweder chemisch gleich einem der gewöhnlichen Elemente und gehören also an die gleiche Stelle des Systems wie dieses, oder es kommen ihnen auf Grund ihrer neuen chemischen Eigenschaften die vorher unbesetzten Stellen des Systems zu. Trotz der großen Zahl der neuen Elemente ist die Mannigfaltigkeit ihrer chemischen Eigenschaften nicht größer als es das periodische System zuläßt. Es sei erwähnt, daß für eine solche Gruppe untrennbarer Elemente, der eine Stelle im periodischen System zukommt, der Verfasser die Bezeichnung Plejade vorgeschlagen hat, während die Glieder einer Plejade nach Soddy isotope Elemente oder Isotopen genannt werden.

Ein Punkt muß aber noch berücksichtigt werden. Nach der üblichen Auffassung entspricht ja eine Stelle im periodischen System nicht nur einem bestimmten chemischen Verhalten, sondern auch einem bestimmten Atomgewicht, und es galt für die Grundlage des periodischen Systems, daß das Atomgewicht die chemischen Eigenschaften eines Elementes bestimmt. Unsere Tabelle 2 lehrt nun in dieser Hinsicht etwas vollkommen Neues; sie zeigt, daß nicht nur Elemente einer Plejade, die ja gleiches chemisches Verhalten zeigen, bis um 8 Einheiten verschiedene Atomgewichte aufweisen, sondern daß auch Elemente von gleichem Atomgewicht (z. B. U_2, UX_2 und UX_1) einen vollkommen verschiedenen chemischen Charakter besitzen.

Diese ganz neuartigen, überaus wichtigen Ergebnisse machen eine gründliche Revision unserer Anschauungen über die Beziehung zwischen Atomgewicht und anderen Eigenschaften der Elemente erforderlich. Sie ändern aber nichts an der Tatsache, daß in dem nicht radioaktiven Teil des periodischen Systems von Stelle zu Stelle, mit sehr wenigen Ausnahmen (Kap. X, 2), eine mehr oder minder regelmäßige Änderung des Atomgewichtes stattfindet, und es entsteht somit die Frage, ob den letzten zwei Reihen des Systems in dieser Hinsicht eine Ausnahmestellung zukommt. Folgende vom Verfasser (6, 7) angestellte Überlegung zeigt, daß dies wohl nicht der Fall wäre, wenn uns hier wie in den anderen Teilen des Systems nur chemische Methoden zur Verfügung ständen. Man würde dann das Atomgewicht der als ein Element erscheinenden Plejade experimentell bestimmen und dabei einen Mittelwert erhalten, den die einzelnen Glieder der Plejade nach Maßgabe ihrer Mengen im Gemisch beeinflussen würden. Das Verhältnis dieser Mengen hängt aber in erster Linie von der Lebensdauer der betreffenden Elemente ab, und da in den meisten Plejaden eines der Glieder viel langlebiger ist als die übrigen, kann man mit genügender Annäherung sein Atomgewicht als das in das periodische System passende ansehen. Verfährt man auf diese Weise, so bekommt man für die mittleren Atomgewichte der Plejaden Werte, welche den in der Tabelle 2 fett gedruckten Elementen gehören (vgl. auch Tabelle 3), und man sieht, daß die Atomgewichte der Elemente einer Horizontalreihe von rechts nach links regelmäßig abnehmen, so wie in den übrigen Reihen des periodischen Systems; es verschwindet somit auf diese Weise die wirkliche Unregelmäßigkeit der Atomgewichte, die die vielen Elemente verursachen. Also auch in dieser Hinsicht ist eine Übereinstimmung der letzten zwei Reihen mit den übrigen zu verzeichnen. Mit um so größerem Rechte darf man versuchen, die neuen Erkenntnisse, die uns das Studium des radioaktiven Teiles des Systems gebracht hat, auf das ganze System zu übertragen.

V. Verschiebungssätze.

1. Geschichte ihrer Aufstellung.

Hand in Hand mit der Erforschung der chemischen und elektrochemischen Eigenschaften der Radioelemente ging das Suchen nach Beziehungen zwischen diesen Eigenschaften und den radioaktiven Umwandlungen, die die Elemente erleiden. Als der erste Versuch nach dieser Richtung ist die sogenannte Lerch-Lucassche Regel anzusprechen.

Auf Grund von elektrochemischen Ver-

Tabelle 3.

	o	VIII		I		II		III		IV		V		VI		VII	
				a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1 H	**2** He			**3** Li		**4** Be		**5** B		**6** C		**7** N		**8** O		**9** F	
1,008	4,00			6,94		9,1		11,0		12,00		14,01		16,00		19,0	
	10 Ne			**11** Na		**12** Mg		**13** Al		**14** Si		**15** P		**16** S		**17** Cl	
	20,2			23,00		24,32		27,1		28,3		31,04		32,06		35,46	
	18 A			**19** K		**20** Ca		**21** Sc		**22** Ti		**23** V		**24** Cr		**25** Mn	
	39,88			39,10		40,07		44,1		48,1		51,0		52,0		54,93	
		26 Fe	**27** Co **28** Ni	**29** Cu		**30** Zn		**31** Ga		**32** Ge		**33** As		**34** Se		**35** Br	
		55,84	58,97 58,68	63,57		65,37		69,9		72,5		74,96		79,2		79,92	
	36 Kr			**37** Rb		**38** Sr		**39** Y		**40** Zr		**41** Nb		**42** Mo		**43** —	
	82,92			85,45		87,63		88,7		90,6		93,5		96,0			
		44 Ru	**45** Rh **46** Pd	**47** Ag		**48** Cd		**49** In		**50** Sn		**51** Sb		**52** Te		**53** J	
		101,7	102,9 106,7	107,88		112,40		114,8		118,7		120,2		127,5		126,92	
	54 X			**55** Cs		**56** Ba		**57** La		**58** Ce	**59** Pr	**60** Nd		**61** —	**62** Sm	**63** Eu	
	130,2			132,81		137,37		139,0		140,25	140,6	144,3			150,4	152,0	
	64 Gd	**65** Tb	**66** Ds **67** Ho	**68** Er	**69** Tu	**70** Yb	**71** Lu	**72** —		**73** Ta		**74** W		**75** —			
	157,3	159,2	162,5 163,5	167,7	168,5	173,5	175,0			181,5		184,0					
		76 Os	**77** Ir **78** Pt	**79** Au		**80** Hg		**81** Tl		**82** Pb		**83** Bi		**84** Po		**85** —	
		190,9	193,1 195,2	197,2		200,6		204,0		207,20		208,0		(210,0)			
	86 Em			**87** —		**88** Ra		**89** Ac		**90** Th		**91** Bv		**92** U			
	(222,0)					226,0		(227)		232,15		(234)		238,2			

Neben den Bezeichnungen der Elemente sind die Ordnungszahlen, unterhalb die Atomgewichte angegeben.

suchen von F. v. Lerch[1]) und anderer[2]) hat R. Lucas[3]) den Satz aufgestellt, daß bei jeder radioaktiven Umwandlung das Umwandlungsprodukt edler ist als die Muttersubstanz. Diese Regel war mehrere Jahre hindurch in der Literatur verbreitet, bis G. v. Hevesy[4]) und der Verfasser[5]) auf Grund früherer und eigener Versuche hervorgehoben haben, daß die Regel ungefähr gleich oft versagt als gilt. Fajans[6]) hat bald darauf gezeigt, daß die Lucassche Regel nur bei den Umwandlungen gilt, die mit Aussendung von β-Strahlen verlaufen, bei diesen ist in der Tat ausnahmslos das Umwandlungsprodukt edler als die direkte Muttersubstanz, während bei α-Strahlenumwandlungen immer das Gegenteil zutrifft.

Ausgehend von diesen elektrochemischen Beziehungen konnte der Verfasser auch die Frage der Verschiebungen im periodischen System bei radioaktiven Umwandlungen aufklären, die früher schon den Gegenstand von Erörterungen bildete. Am naheliegendsten war in dieser Hinsicht natürlich die Annahme, daß die radioaktiven Reihen durch alle Gruppen des Systems eindeutig zu Stellen niedrigerer Atomgewichte führen[1]).

Wie Soddy[2]) zuerst zeigte, entspricht aber diese Annahme nicht den Tatsachen. Er wies darauf hin, daß bei den α-Umwandlungen, für welche der chemische Charakter sowohl der Muttersubstanz wie des Umwandlungsproduktes zu dieser Zeit schon bekannt war,

1) Jahrb. d. Radioakt. u. Elektronik **2**, 470, 1905; Ann. d. Phys. **20**, 345, 1906.
2) Vgl. z. B. St. Meyer und E. v. Schweidler, Wien. Ber. **115** (IIa), 698, 1906.
3) Diese Zeitschr. **7**, 340, 1906.
4) Diese Zeitschr. **13**, 672, 1912.
5) Le Radium **9**, 239, 1912.
6) Habilitationsschrift Karlsruhe S. 64, 1912 und (6).

1) A. Cameron, Nature **82**, 67, 1909; D. Strömholm und The Svedberg, Zeitschr. f. anorg. Chem. **63**, 197, 1909; A. van den Broek diese Zeitschr. **12**, 490, 1911; **14**, 32, 1913.
2) (2) S. 61.

letzteres zu der zweitniedrigeren Gruppe des Systems von der Muttersubstanz verschoben wird. So führt eine α-Umwandlung vom *Th* der vierten Gruppe zum $MsTh_1$ der zweiten, vom *Ra* der zweiten zur *RaEm* der nullten Gruppe. Es ist aber auch die Richtung des Durchganges durch die verschiedenen Gruppen nicht immer dieselbe: so geht die Thoriumreihe von der vierten Gruppe (*Th*) zur zweiten ($MsTh_1$), dann wieder zur vierten (*RaTh*), um nun über die zweite (*ThX*) Gruppe zur nullten (*ThEm*) zu führen.

Die vollkommene Aufklärung der hier obwaltenden Verhältnisse ist erst zwei Jahre später gelungen. v. Hevesy (4), Russell (5) und Fajans (6) haben fast zu gleicher Zeit diese Frage diskutiert.

v. Hevesy bestimmte die Valenz vieler Radioelemente durch Messung der Diffusionsgeschwindigkeit ihrer Ionen. Die für die Glieder der Umwandlungsreihen vor den Emanationen erhaltenen Resultate, die mit den damals bekannten chemischen Eigenschaften dieser Radioelemente in Einklang standen, sprachen dafür, daß eine α-Umwandlung die Erniedrigung der Valenz um zwei Einheiten, eine β-Umwandlung eine Erhöhung um eine Einheit herbeiführt. Nach den Emanationen sollten jedoch, im Gegensatz zu den Verhältnissen vor den Emanationen, die α-Umwandlungen eine Erhöhung der Valenz um zwei, die β-Umwandlungen eine Erniedrigung um eine Einheit bedingen. Die Ausführungen von v. Hevesy bezogen sich dabei weniger auf Gruppenänderungen im periodischen System als auf Valenzänderungen[1]) der Radioelemente.

Russell ging von der Soddyschen Beobachtung aus, daß bei α-Umwandlungen eine Verschiebung um zwei Gruppen stattfindet und nahm an, daß diese Verschiebung sowohl zu höheren, als auch zu niedrigeren Gruppen stattfinden kann. Bei β-Umwandlungen sollte ebenfalls eine Verschiebung in beiden Richtungen stattfinden können, aber nur um eine Gruppe.

Wie schon erwähnt wurde, dienten als Ausgangspunkt der Ausführungen von Fajans die von ihm aufgestellten Sätze, daß α-Umwandlungen zu elektropositiveren, β-Umwandlungen zu elektronegativeren (edleren) Radioelementen führen. Da in einer Horizontalreihe des periodischen Systems der elektronegative Charakter mit wenigen Ausnahmen[1]) von niedrigeren zu höheren Gruppen zunimmt, wurde gefolgert, daß bei α-Umwandlungen eine Verschiebung zu niedrigeren, bei β-Umwandlungen zu höheren Gruppen stattfindet, und zwar wurde in Übereinstimmung mit der bekannten chemischen Natur etwa der Hälfte aller Radioelemente angenommen, daß bei allen α-Umwandlungen eine Verschiebung zu der zweitniedrigeren Gruppe (Erweiterung der Soddyschen Regel), während bei allen β-Umwandlungen die Verschiebung zur nächsthöheren Gruppe stattfindet. In derselben Form wurden diese Verschiebungssätze kurz danach von Soddy (8) ausgesprochen und, wie gleich gezeigt wird, kommt ihnen eine allgemeine Gültigkeit zu.

Für die meisten Umwandlungen ersieht man das am besten aus der Tabelle 1, wo sowohl die Gruppen des periodischen Systems, zu denen die Elemente gehören, wie die Art der sie verbindenden Umwandlungen angegeben ist.

2. Anwendungen.

Eine besondere Erwähnung verlangen nur diejenigen Fälle, wo entweder die Reihenfolge der Umwandlungen bzw. der chemische Charakter der Elemente nicht sicher bekannt ist, oder wo die Strahlung eine zusammengesetzte ist.

a) Anfang der Uranreihe. Es waren zur Zeit der Aufstellung der Verschiebungssätze auf Grund von radioaktiven Tatsachen folgende zwei Schemata gleich wahrscheinlich:

$$\underset{\text{VI}}{U_1} \xrightarrow{\alpha} \underset{\text{VI}}{U_2} \xrightarrow{\alpha} \underset{\text{IV}}{UX} \xrightarrow{\beta} \underset{\text{IV}}{Io} \quad \text{oder} \quad \underset{\text{VI}}{U_1} \xrightarrow{\alpha} \underset{\text{IV}}{UX} \xrightarrow{\beta} \underset{\text{VI}}{U_2} \xrightarrow{\alpha} \underset{\text{IV}}{Io}.$$

Wie Soddy[2]) und die anderen drei Autoren hervorgehoben haben, ist das erste Schema unvereinbar mit der sonst geltenden Regel, daß bei jeder Umwandlung eine Veränderung des chemischen Charakters stattfindet, und sie gaben deshalb dem zweiten Schema den Vorzug. Bei der Anwendung der Verschiebungssätze stießen jedoch Russell und Fajans auf den Widerspruch, daß in diesem Schema die β-Umwandlung des *UX* von einer Verschiebung um zwei Gruppen begleitet sein sollte, während ja sonst bei β-Umwandlungen eine Verschiebung nur um eine Gruppe angenommen wurde. Sie stellten deshalb die Hypothese auf, daß Uran *X* eine komplexe Substanz, bestehend aus zwei β-Strahlern vorstellt, und daß das richtige Umwandlungsschema lautet

1) Ein solcher eindeutiger Zusammenhang zwischen der Art der radioaktiven Umwandlung und der Valenz der betr. Elemente ist eigentlich nicht zu erwarten, denn die Valenz vieler Elemente ist eine Größe, die von äußeren chemischen Bedingungen abhängt, während eine radioaktive Umwandlung durch sie nicht beeinflußt werden kann.

1) Vgl. (7) S. 424 (Fußnote).
2) Ann. Report of the Chemical Soc. London **9**, 321, 1912.

$$\underset{\text{VI}}{U_1} \xrightarrow{\alpha} \underset{\text{IV}}{UX_1} \xrightarrow{\beta} \underset{\text{V}}{UX_2} \xrightarrow{\beta} \underset{\text{VI}}{U_2} \xrightarrow{\alpha} \underset{\text{IV}}{Io}.$$

In der Tat haben Versuche, die von Fajans und O. Göhring[1]) zur Prüfung dieser Hypothese angestellt wurden, zur Isolierung des neuen Elements UX_2 geführt, dessen Existenz von O. Hahn und L. Meitner[2]) und von A. Fleck[3]) bestätigt wurde. Es wurde zuerst auf elektrochemischem Wege aus dem UX abgeschieden; auf Grund der elektrochemischen Regel war ja vorauszusehen, daß es edler als UX_1 ist. Die chemischen Eigenschaften von UX_2 konnten wegen seiner Kurzlebigkeit nicht sehr eingehend geprüft werden. Soweit sie bekannt sind, stehen sie aber in bester Übereinstimmung mit der Forderung der Theorie, daß UX_2 das vorher fehlende höhere Homologe des Tantals vorstellt, und daß ihm im periodischen System die sonst freie Stelle in der fünften Gruppe und der letzten Horizontalreihe zukommt. Da das UX_2 eine eigene Stellung im System einnimmt, wurde ihm ein besonderer nicht genetischer Name — Brevium (*Bv*) beigelegt.

b) Was die kurzlebigen Elemente Radium C', Thorium C_2 und Aktinium C_2 anbelangt, deren chemische Natur nicht experimentell bestimmt werden kann[4]), so folgt aus ihrer Entstehung durch β-Umwandlung aus den Isotopen des Wismuts RaC_1, ThC_1 und AcC_1, daß sie in die sechste Gruppe, nämlich in die Poloniumplejade gehören. In bester Übereinstimmung damit steht die Tatsache, daß aus RaC' durch eine α-Umwandlung das mit Blei isotope RaD gebildet wird. Die durch α-Umwandlung aus RaC_1, ThC_1 und AcC_1 entstehenden Elemente RaC_2, ThD und AcD sollten nach dem Verschiebungssatz Glieder der Thalliumplejade vorstellen, und auch dies haben die Versuche im Falle von ThD und AcD bestätigt. Man kann ohne Bedenken dasselbe von RaC_2 annehmen.

c) Die α-Umwandlungen der Emanationen führen aus der nullten Gruppe der letzten Horizontalreihe in die sechste der nächsthöheren, was sich im Falle des RaA direkt aus der Bestimmung seiner chemischen Natur ergibt, und für ThA und AcA auf Grund der Analogie der drei Reihen geschlossen werden kann. Dies zeigt, daß die nullte Gruppe zugleich den Charakter der achten Gruppe aufweist, es ist also rationell, bei der üblichen tabellarischen Darstellungsweise des periodischen Systems die Triaden der achten Gruppe in die Lücken, die die nullte Gruppe aufweist, zu stellen. Es wird dann bei den α-Umwandlungen der Emanationen wie sonst eine Gruppe, nämlich die siebente, übersprungen.

d) Die strahlenlosen Umwandlungen des Ac[1]) und $MsTh_1$ weisen auf Grund der Verschiebungssätze den Charakter von β-Umwandlungen auf. Die erste führt nämlich aus der dritten Gruppe zur vierten, die zweite aus der zweiten Gruppe in die dritte. Man darf also annehmen, daß diese Elemente eine sehr weiche, schwer nachweisbare β-Strahlung emittieren.

e) Komplexe Strahlung. Nicht ganz aufgeklärt ist das Verhalten der Elemente Ra. $RdTh$ und $RdAc$, die sowohl α- als β-Strahlen emittieren. In allen übrigen ähnlichen Fällen haben sich die betreffenden Produkte entweder als Gemische zweier sukzessiver Elemente erwiesen, von denen das eine α-, das andere β-Strahlen aussendet, oder man konnte, wie im Falle der C_1-Glieder, eine doppelte Umwandlung (Verzweigung) nachweisen. Die erste Möglichkeit wird bei Ra, $RdTh$ und $RdAc$ durch die Verschiebungssätze ausgeschlossen, weil die uns bekannten Umwandlungen dieser Elemente in $RaEm$, ThX und AcX sich in chemischer Hinsicht wie normale α-Umwandlungen verhalten. Gegen die Annahme von Verzweigungen sind keine bindenden Beweise vorhanden, es ist nur zu erwähnen, daß die Versuche zur Auffindung der in solchem Falle zu erwartenden Produkte der hypothetischen β-Umwandlungen beim Ra und $RdAc$ bis jetzt zu keinem positiven Ergebnis geführt haben. Außer der Möglichkeit der Verzweigungen wäre noch in Betracht zu ziehen, ob die erwähnten Elemente nicht Beimengungen von unbekannten Isotopen enthalten. Sollte sich jedoch keine dieser Hypothesen bestätigen, so wären die beobachteten β-Strahlen als ein sekundärer Effekt bei der Aussendung der α-Strahlen zu betrachten.

Diese Fälle und das Verhalten der C_1-Glie-

1) Naturwissenschaften **1**, 339, 1913; diese Zeitschr. **14**, 877, 1913.

2) Diese Zeitschr. **14**, 758, 1913.

3) Phil. Mag. **26**, 528, 1913.

4) Die Existenz dieser Elemente wurde ursprünglich angenommen, um der Geigerschen Beziehung zwischen der Reichweite der α-Strahlen und der Lebensdauer der betr. Elemente zu genügen ([3] S. 40). Durch die Verschiebungssätze erhält diese Annahme eine neue Stütze.

1) Beim Aktinium ist nach Befreiung von allen seinen Umwandlungsprodukten eine sehr schwache (nur 0,2—0,3 Proz. der gesamten α-Strahlung des Ac im Gleichgewicht mit seinen Produkten) α-Strahlung nachgewiesen worden (O. Hahn und M. Rothenbach, diese Zeitschr. **14**, 409, 1913; St. Meyer, V. Heß und F. Paneth, Wien. Ber. **123** (IIa), 1486, 1914). Sie deutet entweder eine duale Umwandlung des Ac an oder ist auf Beimengungen von unbekannten Isotopen zurückzuführen. Ähnliches gilt für die komplexe Natur der α-Strahlen des Radioaktiniums (l. c.).

der zeigen, daß wenn auch die von den einzelnen Elementen emittierten Strahlen eine scharfe Einteilung der Radioelemente in α- und β-Strahler nicht zulassen, es auf Grund der Verschiebungssätze nicht nur möglich, sondern auch notwendig ist, streng zwischen α- und β-Umwandlungen zu unterscheiden[1]). Bei der schematischen Darstellung der Umwandlungen kommt das klar zum Ausdruck, wenn man z. B. statt

$$\overset{\alpha\ \beta}{\blacktriangle\ \blacktriangle}\quad \overset{\alpha\ \beta}{RdAc \rightarrow AcX} \text{ schreibt}^2) \quad RdAc \overset{\beta}{\rightarrow} \overset{\alpha}{\rightarrow} AcX.$$

f) Uran Y (*UY*). Über dieses Element ist nur so viel bekannt[3]), daß es entweder aus U_1 oder aus U_2 (direkt bzw. durch Vermittlung unbekannter kurzlebiger Elemente) entsteht und ein Abzweigungsprodukt von der Haupt-Uran-Reihe vorstellt. Es scheint von UX_1 chemisch untrennbar zu sein, gehört also wohl wie dieses in die Gruppe IVa[4]). Aus den Verschiebungssätzen kann man also folgern, daß *UY* aus seiner in die Gruppe VIa gehörenden Muttersubstanz (U_1 oder U_2) wohl durch eine α-Umwandlung entsteht. Das Produkt der β-Umwandlung des *UY* müßte mit *Bv* isotop sein. Es ist aber bis jetzt nicht gelungen, ein solches Produkt zu finden[5]).

g) Aktiniumgenesis. Auch bei den Versuchen zur Aufklärung der Aktiniumgenesis, nämlich der Frage, an welcher Stelle die Aktiniumreihe von der Uran-Radiumreihe abgezweigt wird, hat man die Verschiebungssätze als Wegweiser benutzt, bis jetzt allerdings ohne positiven Erfolg. Jedenfalls ist die Zahl der Möglichkeiten bedeutend zusammengeschrumpft. Näheres ist Originalarbeiten zu entnehmen[6]).

VI. Atomgewicht und Lebensdauer der Isotopen.

Isotope Elemente unterscheiden sich hauptsächlich durch ihr Atomgewicht und radioaktive Eigenschaften, namentlich die Lebensdauer. Überlegungen allgemeiner Natur[1]) führten den Verfasser zu der Überzeugung, daß zwischen der Lebensdauer und dem Atomgewicht der Isotopen Beziehungen bestehen müssen. In der Tat ließen sich einige Regelmäßigkeiten finden[2]), die im folgenden besprochen werden[3]).

Betrachtet man zunächst nur die Glieder der Uran-Radium- und der Thoriumreihe, deren Atomgewichte ja mit großer Annäherung bekannt sind, so zeigt sich (vgl. Tabelle 2), daß innerhalb einer Plejade die Lebensdauer der α-Strahler[4]) mit fallendem Atomgewicht abnimmt, während die Lebensdauer der β-Strahler mit steigendem Atomgewicht abnimmt. Die einzige Ausnahme bildet das Polonium (*RaF*), welches bei weitem das langlebigste Glied seiner nur aus α-Strahlern bestehenden Plejade ist, obwohl sein Atomgewicht am kleinsten ist. Es entsteht sofort die Frage, welches Atomgewicht Aktinium besitzen muß, damit die Glieder seiner Familie diesen Regeln sich unterordnen. Wie die Tabelle 2 zeigt, erhält man die beste Übereinstimmung, wenn man dem *Ac* ein Atomgewicht zwischen 226 und 228, also ungefähr 227 zuschreibt (10)[5]). Die Reihenfolge der Atomgewichte analoger Produkte der drei Reihen ist dann: Uran-Radiumreihe, Thoriumreihe, Aktiniumreihe, z. B. bei den drei Emanationen *RaEm* 222, *ThEm* 220, *AcEm* 219. Sieht man einstweilen von der Wismutplejade ab, in der die C_1-Glieder sowohl α- als β-Strahler vorstellen, so weisen von den Gliedern der Aktiniumreihe nur *AcX* und *AcB* kleine Abweichungen von der Regel auf, während AcC_2 dieselbe auffallende Anomalität zeigt, wie schon beim *RaF* erwähnt wurde.

Ausgehend von dem Verhalten der Poloniumplejade hat R. Swinne die Ansicht ausgesprochen[6]), daß die Atomgewichte und Lebens-

1) In Tabelle 2 ist neben den Bezeichnungen der Elemente die Art ihrer bekannten Umwandlungen verzeichnet. An der Hand der Verschiebungssätze und der bekannten Atomgewichtsänderungen bei den Umwandlungen läßt sich aus der Tabelle 2 leicht herauslesen, auf welche Weise die drei Reihen die Gruppen des periodischen Systems durchwandern. Vgl. auch (3) S. 9.

2) Wie in Tabelle 1 geschehen.

3) G. Antonoff, Phil. Mag. **22**, 419, 1911; Le Radium **10**, 406, 1913; F. Soddy, Phil. Mag. **27**, 215, 1914; O. Hahn u. L. Meitner, diese Zeitschr. **15**, 236, 1914.

4) In der Tabelle 2 wurde *UY* nicht berücksichtigt, da sein Atomgewicht unbekannt ist.

5) O. Göhring, diese Zeitschr. **15**, 642, 1914.

6) F. Soddy, Nature **91**, 634, 1913 und Ann. Reports of the Chem. Soc. London **10**, 268, 1913; F. Paneth und K. Fajans, Wien. Ber. **123** (IIa), 1627, 1914; O. Hahn und L. Meitner, diese Zeitschr. **14**, 752, 1913; O. Göhring l. c.

1) Vgl. Einleitung und (7) S. 438.

2) K. Fajans, Le Radium **10**, 171, 1913.

3) Auf Beziehungen zwischen der Lebensdauer analoger α-Strahler der drei Reihen hat schon früher R. Swinne (diese Zeitschr. **14**, 142, 1913) aufmerksam gemacht.

4) Unter α- bzw. β-Strahlern werden hier und im folgenden Elemente verstanden, die einer α- bzw. β-Umwandlung unterliegen. (Kap. V, 2e.)

5) Sollte die Aktiniumreihe mit der Uran-Radiumreihe nur durch α- und β-Umwandlungen verknüpft sein, so müßte für das Atomgewicht des *Ac* der Wert 226 angenommen werden. Sollte aber ein Wert in der Nähe von 227, wie es den Anschein hat, dem Atomgewicht des *Ac* entsprechen, so wäre z. B. an Wasserstoffumwandlungen zu denken (vgl. Kap. X, 6). Der Wert 230, der von manchen Autoren dem *Ac* zugeschrieben wird, ist aber vom Standpunkte der obigen Regeln jedenfalls sehr wenig wahrscheinlich.

6) Vortrag i. d. Chem. Ges. Heidelberg, vgl. die Re-

dauer innerhalb einer Plejade nicht eindeutig symbat (bei den α-Strahlern) und antibat (bei den β-Strahlern) verlaufen, sondern daß bei den α-Strahlern ein Minimum, bei den β-Strahlern ein Maximum der Lebensdauer auftritt. In der Poloniumplejade ist dies zweifellos der Fall. Es ist möglich, daß Ähnliches auch für andere Plejaden Geltung hätte[1]), wenn in ihnen eine größere Zahl von Gliedern bekannt wäre.

Das Verhalten der C_1-Glieder muß besonders besprochen werden[2]). Die oben diskutierten Regeln zeigen, daß die Tendenz zur Umwandlung bei den Isotopen vom Atomgewicht abhängt, und zwar ist die Abhängigkeit für α-Umwandlungen entgegengesetzt der für β-Umwandlungen. Um die Regel auf die C_1-Glieder, die sowohl einer α- als einer β-Umwandlung unterliegen, anzuwenden, muß deshalb ihre Neigung zu diesen Umwandlungen gesondert verglichen werden. Die Umwandlungskonstante λ dieser Elemente läßt sich betrachten[3]) als die Summe der voneinander unabhängigen Umwandlungskonstanten λ_α und λ_β der beiden Umwandlungen, deren Verhältnis dem Verzweigungsverhältnis gleich ist. Wir können somit aus den bekannten Halbwertszeiten und Verzweigungsverhältnissen[4]) der C_1-Glieder diejenigen Halbwertszeiten berechnen, die diese Produkte hätten, wenn sie nur der α- oder β-Umwandlung unterliegen würden, und somit ein Maß für ihre Tendenz zu diesen Umwandlungen gewinnen. Auf diese Weise erhält man folgende Tabelle.

Tabelle 4.

	Halbwertszeit	Atomgewicht	Halbwertszeit	
RaE	5 Tage	210	—	—
$AcC_1\beta$	22 Std.	(211)	2,15 Min.	$AcC_1\alpha$
$ThC_1\beta$	1,55 Std.	212	2,86 Std.	$ThC_1\alpha$
$RaC_1\beta$	19,5 Min.	214	45 Tage	$RaC_1\alpha$

In Übereinstimmung mit den von reinen α- oder β-Strahlern befolgten Regeln nimmt auch bei den C_1-Gliedern mit fallendem Atomgewicht die Tendenz zur α-Umwandlung zu, die Tendenz zur β-Umwandlung ab. Wie ersichtlich, unterordnet sich auch *RaE* der Regel, wenn es als reiner β-Strahler betrachtet wird, und seine Umwandlungsgeschwindigkeit mit der β-Umwandlungstendenz der anderen Glieder seiner Plejade verglichen wird.

VII. Die Endprodukte der Zerfallsreihen und die isotopen Bleisorten.

1. Theoretisches.

Die Umwandlungsprodukte des *RaF* und RaC_2, *ThD* und ThC_2, *AcD* und AcC_2 konnten radioaktiv nicht nachgewiesen werden und man nahm gewöhnlich an, daß die bei der Umwandlung dieser Elemente entstehenden Produkte vollkommen stabil sind. Man nannte sie deshalb Endprodukte der Reihen und vermutete, daß sie mit einem oder mehreren der gewöhnlichen Elemente identisch sind. Vor der Einreihung der Radioelemente in das periodische System ist es nur im Falle des Umwandlungsproduktes des *RaF* (*RaG*) gelungen, die Frage nach seiner Natur mit großer Wahrscheinlichkeit zu beantworten.

Nach einer zuerst von B. Boltwood[1]) geäußerten Ansicht bildet das Blei das Endprodukt der Uran-Radium-Poloniumreihe. Diese Auffassung stützte sich hauptsächlich auf die Tatsache, daß man Blei in allen Uranmineralien findet, und zwar in Mengen, die bei Mineralien gleichen Alters proportional dem Urangehalt sind, und bei verschieden alten Mineralien mit dem Alter steigen. Beides ist zu erwarten, wenn das Blei durch den langsamen Zerfall des Urans entsteht und im Laufe geologischer Zeiten in dem Mineral akkumuliert wird. Auch ein Vergleich der Atomgewichte schien diese Auffassung zu stützen. Ging man von dem früher geltenden Werte für das Atomgewicht des U_1 (238,5) oder *Ra* (226,4) aus, so erhielt man in bekannter Weise für das zu erwartende Atomgewicht des *RaG* den Wert 206,5 bzw. 206,4, dem das Atomgewicht des Bleies (207,1) von allen gewöhnlichen Elementen am nächsten lag. Die bestehende Diskrepanz dachte man auf kleine Umsicherheiten der Atomgewichte zurückführen zu können. Nun hat aber die Revision der betreffenden Atomgewichte den Unterschied nicht verkleinert, sondern wesentlich vergrößert. Aus den jetzt geltenden Werten für das Atomgewicht des U_1 (238,2) und *Ra* (226,0) berechnet sich das Atomgewicht

ferate Chemiker-Ztg. 1914 S. 1026, Zeitschr. f. angew Chemie **27** (III), 596, 1914.

1) Das Verhalten des *AcX* steht in Übereinstimmung mit dieser Ansicht. Vgl. auch Kap. VII, 4.

2) K. Fajans, diese Zeitschr. **14**, 951, 1913.

3) F. Soddy, Phil. Mag. **18**, 739, 1909; E. Marsden und C. G. Darwin, Proc. Roy. Soc. **87** A, 17, 1912.

4) Wie aus Tabelle 1 zu ersehen ist, beträgt $\frac{\lambda\alpha}{\lambda\beta}$ beim RaC_1 $\frac{3}{9997}$, beim ThC_1 $\frac{35}{65}$, beim AcC_1 $\frac{9985}{15}$. Näheres vgl. (3) S. 40 und E. Marsden und P. B. Perkins, Jahrb. d. Radioakt. u. Elektron. **11**, 211, 1914.

1) Am. Journ. Science **20**, 253, 1905; **23**, 77, 1907; vgl. auch A. Holmes, Proc. Roy. Soc. **85** (A), 248, 1911.

des *RaG* zu 206,2 bzw. 206,0, während das Atomgewicht des Bleies 207,20 ist[1]).

Die Einreihung der Radioelemente in das periodische System und der Begriff der Isotopie ergaben nun den Weg zur Aufklärung dieses Widerspruches und gleichzeitig auch wichtige Aufschlüsse über die Natur der übrigen „Endprodukte". Die Anwendung der Verschiebungssätze auf die Umwandlungen der oben genannten 6 Elemente ergibt (vgl. Tabelle 1), daß ihre Umwandlungsprodukte alle in die Bleiplejade gehören. Im Falle des *RaG* steht dieses Resultat in bezug auf das qualitativ-chemische Verhalten in bester Übereinstimmung mit der Boltwoodschen Hypothese. Weiterhin genügte es anzunehmen, daß das *RaG*, d. h. das in Uranmineralien vorkommende „Blei" dem gewöhnlichen Blei nur in chemischen Eigenschaften, nicht aber im Atomgewicht gleicht, d. h. mit ihm isotop ist, um den Widerspruch der Atomgewichtsbetrachtung zu erklären.

Die beiden Umwandlungsprodukte des *ThD* und ThC_2 haben gleiche chemische Eigenschaften (beide sind Isotopen des Bleies) und auch ihr berechnetes Atomgewicht ist gleich, und zwar 208,1. Vom chemischen Standpunkt betrachtet können wir sie deshalb als ein Element auffassen und Thoriumblei (oder ThD_2) nennen. Es muß in Thormineralien vorzufinden sein. Wie wir gleich sehen werden, ist das Thorblei nicht vollkommen stabil, so daß es offen bleibt, ob seine zwei Bestandteile auch die gleiche Lebensdauer haben. Aber auch das ist auf Grund der Abhängigkeit der Lebensdauer der Isotopen vom Atomgewicht wahrscheinlich[2]).

Aus denselben Gründen wie beim Thoriumblei können wir auch die Umwandlungsprodukte des *AcD* und AcC_2 vom chemischen Standpunkte als ein Element betrachten, und werden es Aktiniumblei (AcD_2) nennen. Sein zu erwartendes Atomgewicht hängt von dem unbekannten Atomgewicht des Aktiniums selbst ab. Wenn letzteres gleich 226 bzw. 227 ist, so ist das Atomgewicht des Aktiniumbleies zu 206 bzw. 207 anzunehmen. Da das Aktinium aus Uran entsteht, muß das Aktiniumblei in Uranmineralien sich vorfinden, und da es vom *RaG* chemisch untrennbar ist, wird das aus diesen Mineralien gewinnbare „Blei" — Uranblei — ein Gemisch von *RaG* und AcD_2 vorstellen. Da aber die Aktiniumreihe eine Abzweigung im Verhältnis von nur 8 : 92 von der Haupturanreihe bildet, kann das AcD_2, wenn es nicht viel stabiler als *RaG* ist, dessen Atomgewicht nur wenig beeinflussen[1]).

Obige Betrachtung, die vom Verfasser und von Soddy[2]) in der Hauptsache schon gelegentlich ihrer ersten Arbeiten über die Einreihung der Radioelemente in das periodische System angestellt wurde[3]), zeigt, daß es mehrere radioaktiv nicht nachweisbare Bleisorten geben muß, deren Atomgewichte zwischen den stark verschiedenen Werten 206,0 und 208,1 liegen, während das Atomgewicht des gewöhnlichen Bleies 207,2 beträgt. Es eröffnete sich somit der Weg, direkt experimentell die Existenz von Bleisorten mit verschiedenem Atomgewicht festzustellen, wenn es gelang, die betreffenden Elemente voneinander getrennt zu erhalten. Die zur Prüfung dieser Überlegungen angestellten Versuche haben nun gezeigt, daß dies zum Teil wenigstens möglich ist.

2. Uranblei.

Als Ausgangsmaterial für derartige Untersuchungen sind als Idealfälle thorfreie Uranmineralien und uranfreie Thormineralien zu betrachten. Erstere sind leicht zugänglich, und es konnte deshalb die Frage des Uranbleies einer gründlichen Untersuchung unterzogen werden. Atomgewichtsbestimmungen an aus verschiedenen Uranmineralien abgeschiedenen Bleipräparaten sind fast gleichzeitig von Th. W. Richards und M. Lembert[4]), Maurice Curie[5]), O. Hönigschmid und Frl. St. Horovitz[6]) angestellt worden. Richards und

1) G. P. Baxter, Th. Thorvaldson und F. L. Grover, Journ. Am. Chem. Soc. **37**, 1020 u. 1027, 1915.

2) Wegen der verschiedenen Geschwindigkeit der α-Strahlen des ThC_1 und ThC_2 ist der Energieverlust auf den beiden Umwandlungszweigen etwas verschieden, weswegen allerdings zwischen den Umwandlungsprodukten von *ThD* und ThC_2 ein Atomgewichtsunterschied von wenigen Einheiten der dritten Dezimale zu erwarten ist. Ob dieser Unterschied genügt, um eine Verschiedenheit der Lebensdauer zu bedingen, läßt sich indessen nicht beurteilen.

1) Was das Umwandlungsprodukt des RaC_2 anbelangt, so sind sowohl seine chemischen Eigenschaften als auch das Atomgewicht denen des *RaD* gleich. Es ließ sich aber bis jetzt nicht entscheiden, ob es mit *RaD* identisch ist oder vielleicht ein stabileres in Mineralien akkumulierbares Element vorstellt. Doch ist wegen der außerordentlich kleinen Mengen, in welchen das RaC_2 gebildet wird, diese Frage für die folgenden Betrachtungen praktisch belanglos.

2) Die Vermutung, daß das *RaG* ein anderes Atomgewicht als das gewöhnliche Blei hat, wurde privatim etwas früher von Russell geäußert. Vgl. (8) und auch G. v. Hevesy (5).

3) Näheres vgl. (10).

4) Zeitschr. f. anorg. Chem. **88**, 429, 1914. Diese Versuche sind auf direkte Anregung des Verfassers angestellt worden, vgl. (10) und Zeitschr. f. Elektrochem. **20**, 449, 1914.

5) C. R. **158**, 1676, 1914.

6) Wien. Ber. **123** (II b), 1033, 1914.

Lembert untersuchten Bleiproben aus Pechblende (Joachimsthal und Cornwall), Carnotit (Colorado) und Urananit (Nord-Carolina), und erhielten für das Atomgewicht des „Bleies“[1]) die Werte 206,57, 206,86 206,59 und 206,40, während bei der Revision des Atomgewichtes des gewöhnlichen Bleies der Wert 207,15 resultierte. Die Bleipräparate, die Curie zu seinen Versuchen dienten, stammten aus Pechblende, Carnotit und Yttrotantalit, und ergaben als Resultate 206,64, 206,36 und 206,34, während für das gewöhnliche Blei nach derselben Methode sich der Wert 207,01 ergab. Schließlich erhielten Hönigschmid und Frl. Horovitz für Blei aus Joachimsthaler Pechblende den Wert 206,74. Alle diese Resultate haben mit Sicherheit bewiesen, daß in Uranmineralien ein auf chemischem Wege vom Blei untrennbares Element sich befindet, dessen Atomgewicht beträchtlich niedriger als das des gewöhnlichen Bleies ist. Das steht mit den Erwartungen der Theorie, wonach *RaG* mit dem Atomgewichte 206,0 in diesen Mineralien sich befinden sollte, qualitativ im besten Einklang. Die Schwankungen, die Präparate verschiedenen Ursprungs zeigten, sprachen jedoch dafür, daß man es bei den meisten der untersuchten Proben nicht mit reinem radioaktiv entstandenen Uranblei zu tun hatte, sondern daß sie wohl durch gewöhnliches Blei, das von Begleitmineralien stammt, verunreinigt waren. Hönigschmid und Frl. Horovitz untersuchten[2]) deshalb bald darauf Bleipräparate aus sehr reiner kristallisierter Pechblende (Morogoro in Deutsch-Ostafrika) und aus Bröggerit (Moos-Norwegen), und erhielten für das Atomgewicht die Werte 206,05 bzw. 206,06, welche in sehr naher Übereinstimmung mit dem für das *RaG* aus dem Atomgewicht des *Ra* sich ergebenden Wert 205,94[3]) stehen. Ob der etwas höhere experimentelle Wert durch das Vorhandensein des Aktiniumbleies oder des gewöhnlichen Bleies bedingt ist, oder ob hier einer der beim Vergleich der Atomgewichte des Urans und Radiums (Kap. II) diskutierten Umstände mitspielt, läßt sich vorerst nicht entscheiden. So viel kann man jedoch diesem Resultat entnehmen, daß das Atomgewicht des AcD_2 entweder nahe dem des *RaG* steht[1]), oder es stellt das Aktiniumblei ein unstabiles Element vor.

3. Thoriumblei.

Viel schwieriger ist die Frage des Thorbleies. Da uranarme Thormineralien einen nur sehr kleinen Bleigehalt aufweisen, schloß B. Boltwood[2]), daß das Blei als Endprodukt der Thoriumreihe nicht in Betracht kommt. Die Forderung der Verschiebungssätze, daß das ThD_2 ein Glied der Bleiplejade sein muß, läßt sich mit diesem Schluß nur dann vereinbaren, wenn man annimmt[3]), daß das ThD_2 kein vollkommen stabiles Element vorstellt, sondern nur langlebig genug ist, um den radioaktiven Methoden zu entgehen. In der Tat ist ja sowohl das ThD_2 als das AcD_2 analog dem RaD, und unterliegen wohl deshalb wie dieses β-Umwandlungen. Die Beispiele des $MsTh_1$ und *Ac* zeigen aber, daß der Nachweis einer Strahlung bei langlebigen β-Strahlern nicht immer gelingt. Man kann nun auf Grund des Bleigehaltes von uranarmen Thormineralien auch eine angenäherte Schätzung der Lebensdauer des ThD_2 durchführen. Der vom Verfasser (10) beschrittene Weg sei an der Hand eines Beispiels erläutert. Die Analyse eines Thorits[4]) ergab 0,41 Proz. Uran, 29,2 Proz. Thor und nur 0,020 Proz. Blei. Dem Uran entsprechen aber ca. 0,016 Proz. Uranblei, wie man aus dem bei uranreichen Mineralien derselben geologischen Schicht gefundenen konstanten Verhältnis $\frac{\text{Blei}}{U} = 0{,}04$ schließen kann. Für das Thorblei und das evtl. vorhandene primär abgeschiedene gewöhnliche Blei bleiben also nur 0,004 Proz. übrig, so daß man als obere Grenze für das Verhältnis $\frac{ThD_2}{Th}$ erhält $\frac{0{,}004}{29} = 1{,}4 \cdot 10^{-4}$. Dies ist zugleich die obere Grenze für das radioaktive Gleichgewichtsverhältnis, woraus man mit Hilfe der Halbwertszeit des Thoriums ($1{,}5 \cdot 10^{10}$ Jahre) für die obere Grenze der Halbwertszeit des ThD_2 den Wert $2 \cdot 10^6$ J. erhält.

---

1) Im folgenden wird die Bezeichnung Blei, ohne nähere Angabe, ob gewöhnliches oder radioaktiv entstandenes „Blei“ gemeint ist, für in wägbaren Mengen zugängliche Glieder der Bleiplejade oder ihre Gemische benutzt.

2) Wien. Ber. **123** (IIa), 2407, 1914.

3) Nach Abzug vom Atomgewicht des *Ra* (225,97) für 5 Heliumatome 20,00 und für die Energieverminderung 0,03.

1) Wäre das Atomgewicht des als stabil angenommenen AcD_2 210, so müßte das des Uranbleies 206,26 ($0{,}92 \cdot 205{,}94 + 0{,}08 \cdot 210$) betragen, also beträchtlich mehr, als experimentell gefunden. Nimmt man jedoch für AcD_2 207 an, so berechnet sich das Atomgewicht des Uranbleies zu 206,08 in fast vollkommener Übereinstimmung mit dem experimenteilen Wert.

2) Am. Journ. Science **23**, 87, 1907. Vgl. auch A. Holmes, Proc. Roy. Soc. **85** A, 248, 1911.

3) K. Fajans, Le Radium **10**, 171, 1913.

4) A. Holmes l. c. S. 254, derselbe und R. W. Lawson, Phil. Mag. **28**, 832, 1914.

Um auf Grund solcher Analysen nicht nur die obere Grenze, sondern die wirkliche Halbwertszeit des ThD_2 bestimmen zu können, müßte man den Gehalt der Mineralien an gewöhnlichem Blei kennen. Holmes und Lawson[1]) machten nun die Annahme, daß dieser Gehalt pro 1 g bei 4 von ihnen untersuchten Mineralien derselben Fundstätte gleich ist, und konnten durch 4 Kombinationen von je 3 Analysen die drei Unbekannten: die Menge des gewöhnlichen Bleies, das Verhältnis

$$k = \frac{\text{Uranblei}}{\text{Uran}} \text{ und } m = \frac{\text{Thorblei}}{\text{Thor}}$$

bestimmen. Die je 4 erhaltenen Werte schwankten für das gewöhnliche Blei zwischen 0,0000 und 0,0026 (pro 100 g Mineral) für k zwischen 0,042 und 0,044, für m zwischen $2 \cdot 10^{-5}$ und $11{,}4 \cdot 10^{-5}$. Nimmt man m im Mittel zu $7 \cdot 10^{-5}$, so folgt für die Halbwertszeit des ThD_2 ca. 10^6 Jahre. Wie nahe dieser Wert der wirklichen Halbwertszeit des Thoriumbleies entspricht, müssen erst spätere Untersuchungen lehren.

Wegen der relativen Kurzlebigkeit des ThD_2, kann man nur dann hoffen, sein Atomgewicht experimentell bestimmen zu können, wenn man Blei aus Mineralien gewinnt, in denen das Verhältnis Th/U besonders groß ist. Die bisherigen Resultate der Atomgewichtsbestimmungen an Blei aus Thormineralien ergeben nach dieser Richtung noch kein genügend klares Bild.

Richards und Lembert (l. c.) fanden für das Atomgewicht von Blei aus Thorianit (60 Proz. *Th*, 22 Proz. *U*) den Wert 206,82. Berücksichtigt man, daß *U* etwa 3mal schneller zerfällt als *Th*, so müßten im Falle gleicher Stabilität des Uranbleies und des ThD_2 diese zwei Bleisorten in diesem Thorianit in ungefähr gleichen Mengen zugegen sein, woraus das mittlere Atomgewicht 207,1 folgt. Der experimentelle Wert ist beträchtlich kleiner und läßt sich kaum anders als durch die Unstabilität des ThD_2 erklären[2]).

Im Widerspruch mit der Annahme der oben angegebenen Halbwertszeit des ThD_2 scheinen indessen die Versuche von F. Soddy und H. Hymann[3]) und von Soddy[4]) zu stehen. Diese Autoren verglichen durch zwei relative Methoden das Atomgewicht des Bleies aus Thorit (Ceylon), in welchem $Th/U = 35{,}5$ war, mit dem Atomgewicht des gewöhnlichen Bleies. Eine Titrationsmethode ergab für das Thoritblei den Wert 208,5, aus der Dichtebestimmung an den Metallen folgte unter der sehr wahrscheinlichen Voraussetzung des gleichen Atomvolumens der Isotopen (vgl. Kapitel IX, 5), der Wert 207,74, wenn das Atomgewicht des gewöhnlichen Bleies zu 207,20 angenommen wird. Leider war die Genauigkeit der ersten Methode nicht sehr groß, bei der zweiten liegt nur eine Bestimmung vor. Sollten sich jedoch diese Angaben bestätigen, so müßte das Thorblei jedenfalls stabiler sein als oben angegeben (10^6 J.): man kann leicht auf Grund der Zusammensetzung des betr. Thorits berechnen, daß sogar der kleinere Wert 207,74 für die Halbwertszeit des Thorbleies mindestens $8 \cdot 10^7$ J. fordert.

Wenn auch mehrere Punkte der Thorbleifrage noch einer Klärung bedürfen, scheint wenig Zweifel darüber zu bestehen, daß ThD_2 kein vollkommen stabiles Element ist, es stellt also auch nicht das Endprodukt der Thoriumreihe vor. Wenn es einer β-Umwandlung unterliegt, müßte ein Glied der Wismutplejade dabei entstehen[1]). Angaben über das Vorkommen von Wismut in radioaktiven Mineralien gibt es viele, doch lassen sich vorerst über seinen Zusammenhang mit den radioaktiven Reihen nur Vermutungen anstellen.

4. Gewöhnliches Blei.

Von großem Interesse ist die Frage, ob das aus gewöhnlichen Bleimineralien gewinnbare Blei mit dem Atomgewicht 207,2 im Zusammenhang mit den radioaktiven Familien steht. Da sein Atomgewicht zwischen denen des Uranbleies und ThD_2 steht, wäre es am naheliegendsten anzunehmen (6, 7, 8), daß das gewöhnliche Blei ein Gemisch dieser Elemente vorstellt. Wenn jedoch, wie es den Anschein hat, das ThD_2 ein unstabiles Element ist, kann diese Hypothese kaum aufrecht erhalten werden. Ein Zusammenhang mit den bekannten Umwandlungsreihen läßt sich dann nur auf Grund der Annahme vermuten, daß das gewöhnliche Blei mit dem Aktiniumblei identisch ist, dessen Atomgewicht ja auch in der Nähe von 207 liegen dürfte. Dies wäre nicht undenkbar, wenn das AcD_2 beträchtlich langlebiger als RaG[2]) wäre, und somit leichter wie dieses die kosmischen Zeiten überdauern

1) l. c. und ebenda **29**, 673, 1915; Wien. Ber. **123** (IIa), 1373, 1914.

2) M. Curie (l. c.) erhielt für Blei aus Monazit den Wert 207,08, der etwas höher als der von ihm für das gewöhnliche Blei gefundene 207,01 ist. Es läßt sich aber schwer beurteilen, ob die Abweichung die Versuchsfehler überschreitet.

3) Journ. Chem. Soc. **105**, 1402, 1914.

4) Nature **94**, 615, 1915.

1) (6, 7), Holmes und Lawson l. c.

2) Die untere Grenze für die Halbwertszeit des als unstabil angenommenen *RaG* ergibt sich auf Grund von Mineralanalysen zu $2 \cdot 10^8$ J. (10).

könnte[1]). Von großer Bedeutung ist aber jedenfalls der Befund von G. P. Baxter und F. L. Grover[2]), daß die von ihnen untersuchten 7 Proben gewöhnlichen Bleies, die sehr verschiedenen mineralogischen und geographischen Ursprungs waren, innerhalb der Versuchsfehler dasselbe Atomgewicht zeigten.

5. Ionium, Thorium.

Im Falle der isotopen Bleisorten ist es zum ersten Male gelungen, auf gewöhnlichem chemischen Wege die Existenz von Elementen mit verschiedenem Atomgewicht und gleichen chemischen und spektroskopischen (Kap. IX, 4) Eigenschaften nachzuweisen. Im Zusammenhange damit sei hier ein zweiter ähnlicher Fall erwähnt, nämlich der Befund von O. Höningschmid[3]), daß während das Atomgewicht des gewöhnlichen Thoriums aus Monazitsand 232,15 beträgt, ein aus Joachimsthaler Pechblende abgeschiedenes Thorium-Ionium-Gemisch, das weder in chemischer noch in spektroskopischer Hinsicht vom Thorium zu unterscheiden ist, aber eine sehr starke α-Aktivität besitzt, ein Atomgewicht 231,51 zeigt. Nimmt man das Atomgewicht des *Io* zu 230 an, so berechnet sich der Ioniumgehalt des Präparates zu 30 Proz.

VIII. Die Struktur der Atome[4]).

Seit der Entdeckung der negativen Elektronen ist es das Bestreben aller Theorien des Atombaues, diesen auf die negative und positive Elektrizität zurückzuführen. Die Masse des Atoms muß also aus der Masse der das Atom aufbauenden Elektrizität abzuleiten sein. Die Masse des negativen Elektrons beträgt nur 1/1850 der des Wasserstoffatoms. Da man weiterhin auf Grund vieler Erscheinungen zu dem Resultat geführt wurde, daß die Zahl der Elektronen im Wasserstoffatom von der Größenordnung 1 ist, muß gefolgert werden, daß der Hauptteil der Masse des Atoms an seine positive Elektrizität gebunden ist, d. h. daß die positive Elektrizität bei gleicher Ladung eine viel größere Trägheit besitzt als die negative. Als Stütze für diese Auffassung kann auch die Tatsache angesehen werden, daß das Wasserstoffion das leichteste positiv geladene Teilchen ist, das bis jetzt beobachtet wurde. Die nächstliegende Annahme, das Wasserstoffion sei das positive Elektron selbst, hat man indessen lange Zeit aus folgendem Grunde gemieden: das neutrale Wasserstoffatom muß in diesem Falle, wie mit Rutherford (11) und N. Bohr (12) jetzt angenommen wird[1]), aus einem positiven Elektron bestehen, um welches ein negatives Elektron kreist. Nach der klassischen Elektrodynamik könnte jedoch ein solches System nicht stabil sein, denn das kreisende Elektron müßte strahlen, dabei Energie verlieren und schließlich mit dem positiven Elektron zusammenfallen. Es gelang erst Bohr (12) diese Schwierigkeit zu beseitigen: er nimmt im Gegensatz zur klassischen Elektrodynamik an, daß beim Kreisen eines Elektrons keine Strahlungsenergie emittiert wird, und daß ein Elektron nur dann zur Entstehung elektromagnetischer Strahlung Anlaß gibt, wenn es von einer Bewegungsbahn auf eine andere stürzt. Durch die Anwendung der Quantentheorie auf diesen Strahlungsprozeß und auf Grund der erwähnten einfachen Struktur des Wasserstoffatoms ist es Bohr gelungen, nicht nur die allgemeine Form der Balmerschen Wasserstoffserie abzuleiten, sondern auch den Wert der Rydbergschen Konstante aus der Ladung und Masse des negativen Elektrons und der Planckschen Konstante h richtig zu berechnen[2]).

Ist nun das positive Elektron mit dem Wasserstoffion identisch, und ist seine Masse m rein elektromagnetischen Ursprungs, so folgt aus der Formel $m = {}^2/_3 \frac{e^2}{a}$, daß der Radius a des kugelförmig gedachten positiven Elektrons (Ladung e) ca. 10^{-16} cm beträgt, während der Radius des negativen Elektrons zu $2 \cdot 10^{-13}$ cm angenommen wird, der Radius der Atome zu 10^{-8} cm.

Was nun den Bau der schwereren Atome anbelangt, so wurde Rutherford[3]) auf Grund der Versuche von Geiger und Marsden über die Zerstreuung der α-Teilchen bei ihrem Durchgang durch Materie zu folgender Vorstellung geführt: Das Atom jedes Elementes besteht aus einem positiv geladenen Zen-

1) Wendet man die Lebensdauer-Atomgewicht-Regeln auf die Bleiplejade an, indem man alle ihre Glieder als β-Strahler betrachtet (10), so würde die obige Hypothese bedeuten, daß in dieser Plejade beim Atomgewicht 207 die Lebensdauer ein Maximum aufweist, um sowohl zu kleineren wie zu größeren Atomgewichten abzunehmen. Dieses Maximum würde somit der von Swinne (Kap. VI) vorgeschlagenen Form der Regeln entsprechen.

2) Journ. Am. Chem. Soc. **37**, 1027, 1915.

3) Chemiker-Ztg. **39**, 806, 1915.

4) Näheres vgl. (11, 12) und die Discussion on the structure of the atom, Brosch. herausgegeb. von der Roy. Soc. London (19. März 1914).

1) Vgl. aber J. Stark, Ann. d. Physik **48**, 209, 1915 und A. Heydweiller, Verh. d. D. physik. Ges. **17**, 359, 1915.

2) Vgl. auch P. Debye, Ber. Bayr. Akad. 1915, S. 1.

3) Phil. Mag. **21**, 669, 1911.

tralkern, dessen Ladung von Element zu Element wechselt. Um den Kern in konzentrischen Ringen angeordnet kreisen negative Elektronen, deren Gesamtladung im neutralen Zustande des Atoms gleich der Ladung des Kernes ist. Der Radius des Zentralkernes ist sehr klein im Vergleich zum Radius des Atoms, und seine obere Grenze wird für das Goldatom zu $3 \cdot 10^{-12}$ angegeben.

Von grundlegender Bedeutung ist die Frage nach der Größe der positiven Ladung der Atomkerne verschiedener Elemente. Rutherford schloß zuerst auf Grund der Zerstreuungsversuche, daß diese Ladung, ausgedrückt in Elementarquanten als Einheit, ungefähr dem halben Atomgewicht des Elementes gleich ist. Besonders verlockend ist jedoch die in naher Übereinstimmung damit stehende zuerst von A. van den Broek[1]) geäußerte Ansicht. Danach soll die Kernladung gleich sein der Ordnungszahl des Elementes, die man erhält, wenn die Elemente in der Reihenfolge ihrer Anordnung im periodischen System numeriert werden (vgl. Tabelle 3).

Die Ordnungszahl 1 des Wasserstoffes steht somit in bester Übereinstimmung mit der oben erwähnten Annahme, daß sein Kern mit dem positiven Elektron identisch ist. Helium hat die Ordnungszahl 2, und es müßte somit nach der van den Broekschen Hypothese sein Atomkern eine doppelte positive Ladung besitzen, was mit der Rutherfordschen Annahme, daß der Heliumkern mit dem α-Teilchen identisch ist, in bestem Einklang steht[2]).

Die Ordnungszahl und Kernladung des Lithiums soll 3 betragen, die des Berylliums 4 und so weiter bis zum Uran, dessen Ordnungszahl auf Grund weiter zu erläuternder Tatsachen 92 betragen soll.

Über die Anordnung der Elektronen in den schwereren Atomen ist so gut wie gar nichts bekannt. Sogar beim Lithium ist es nicht gelungen, darüber zu wahrscheinlichen Vorstellungen[3]) zu gelangen. Im allgemeinen ist es aber höchstwahrscheinlich, daß die Konfiguration der Elektronen in erster Linie von der Größe der Kernladung abhängt, und daß die chemischen und die meisten physikalischen Eigenschaften der Elemente mit den nahe der Oberfläche des Atoms befindlichen Elektronen zusammenhängen, also von der Kernladung abhängen.

Da die Masse der Atome zum größten Teil an die positive Elektrizität gebunden ist, hängt sie in dem Rutherfordschen Atom mit dem Kern zusammen. Aus dem letzteren müssen auch die positiv geladenen α-Teilchen bei radioaktiven Umwandlungen ihren Ursprung nehmen. Die Unbeeinflußbarkeit der radioaktiven Umwandlungen durch physikalische und chemische Einflüsse steht damit in bester Übereinstimmung. Aus letzterem Grunde nimmt man mit Bohr[1]) und Rutherford an, daß auch die β-Teilchen aus dem Kern ausgeschleudert werden. Die Kerne, mindestens die mancher radioaktiver Atome, müssen somit auch negative Elektronen enthalten. Die positive Ladung des Atomkernes wäre danach eine algebraische Summe der den Kern zusammensetzenden positiven und negativen Teilchen. So könnte z. B. der doppelt geladene Heliumkern mit der Masse 4 aus vier positiven Elektronen (Wasserstoffkernen mit der Masse 1) und zwei negativen Elektronen bestehen[2]). Jedenfalls ist es aber wahrscheinlich, daß das α-Teilchen als Ganzes einen Bestandteil der Kerne der radioaktiven Atome bildet.

Eine überzeugende Stütze der obigen Vorstellungen bilden die Verschiebungssätze und die Existenz der isotopen Elemente. Schon gelegentlich seiner Arbeit über die Stellung der Radioelemente im periodischen System hat Soddy (8) die Verschiebung um eine Stelle im System mit der Änderung des Elektrizitätsgehaltes des Atoms um eine Elementarladung in Zusammenhang gebracht. Zu voller Klarheit gelangte aber dieser Gesichtspunkt erst durch die Heranziehung (Bohr (12) und Soddy[3]) der van den Broekschen Hypothese und durch die Annahme, daß sowohl die α- als die β-Teilchen im Kern ihren Ursprung nehmen. In der Tat, wenn die Erhöhung der Ordnungszahl um eine Einheit um ebenso viel die positive Kernladung vergrößert, muß bei der Emission eines doppelt positiv geladenen α-Teilchens der Übergang zur zweitniedrigeren Gruppe, bei der Emission eines einfach negativ geladenen β-Teilchens ein sol-

1) Diese Zeitschr. **14**, 32, 1913.

2) Daß das α-Teilchen und der Wasserstoffkern einen äußerst kleinen Durchmesser haben (obere Grenze 10^{-13} cm), folgt besonders überzeugend aus der großen Geschwindigkeit, die die Wasserstoffkerne beim Zusammentreffen mit α-Teilchen bei deren Durchgang durch gasförmigen Wasserstoff erhalten. E. Marsden, Phil. Mag. **27**, 824, 1914. G. C. Darwin, ibid. S. 499.

3) (12) und J. W. Nicholson, Phil. Mag. **27**, 541, 1914.

1) (12) S. 500.

2) Allerdings ist mit dieser Vorstellung die Berechnung der oberen Grenze des Radius des α-Teilchens zu 10^{-13} cm schwer zu vereinbaren, wenn der Radius des negativen Elektrons $2 \cdot 10^{-13}$ cm betragen soll.

3) Nature **92**, 399, 1913.

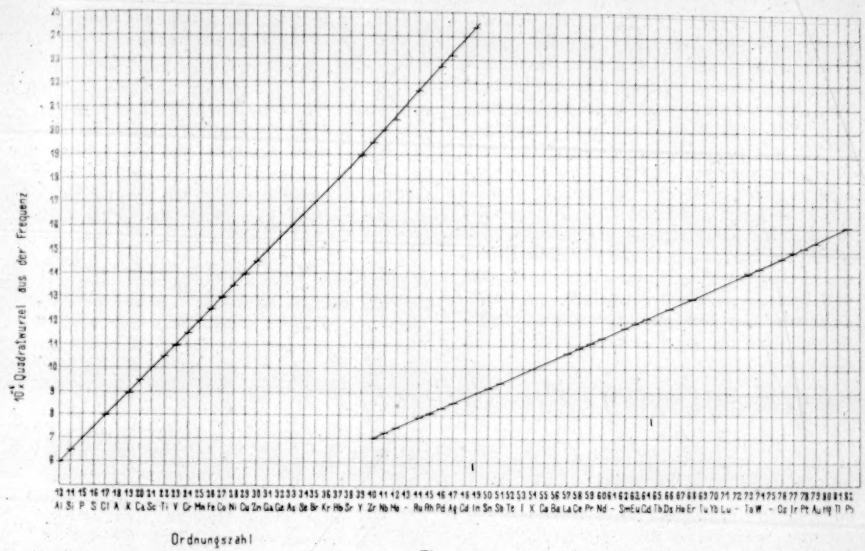


Fig. 1.

cher zur nächsthöheren Gruppe des periodischen Systems stattfinden. Erleidet weiterhin ein Element (U_1) eine α-Umwandlung, und folgen ihr dann zwei β-Umwandlungen, so muß nach dem Obigen die Kernladung des nach der dritten Umwandlung entstehenden Elementes (U_2) gleich sein der Kernladung des ersten Elementes (U_1). Da aber von der Kernladung in erster Linie die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Elemente abhängen, müssen U_1 und U_2 sehr nahe übereinstimmende Eigenschaften besitzen, obwohl ihre Atomgewichte sich um 4 Einheiten unterscheiden. Dadurch ist das Wesen der Isotopie erklärt; ihr liegt die gleiche Kernladung mehrerer Elemente zugrunde.

Die van den Broeksche Hypothese hat weiterhin durch die Moseleyschen Wellenlängenmessungen an charakteristischen Röntgenstrahlen vieler Elemente eine wichtige Stütze erhalten.

Wie Ch. G. Barkla[1]) u. A. zeigten, emittiert jedes Element unter dem Einfluß von Röntgen- oder Kathodenstrahlen eine homogene, sogenannte charakteristische Röntgenstrahlung von bestimmter Härte. Bei mehreren Elementen ist es gelungen zwei Arten charakteristischer Strahlen zu finden, eine härtere — die K-Serie — und eine weichere — die L-Serie. Durch Absorptionsmessungen fand nun Barkla, daß die Härte der charakteristischen Strahlen derselben Serie mit steigendem Atomgewicht der Elemente steigt.

Als die Lauesche Fundamentalentdeckung[1]) der Interferenzerscheinungen der Röntgenstrahlen in Kristallen und die glänzenden Arbeiten von W. H. und W. L. Bragg[2]) Wellenlängenmessungen an Röntgenstrahlen ermöglichten, untersuchte H. G. Moseley (13)[3]) das Röntgenspektrum einer großen Reihe von Elementen. Er fand, daß die Strahlen der K-Serie in der Hauptsache aus zwei scharfen Linien α und β bestehen. Sowohl die Wellenlänge als auch die Intensität der α-Linien ist größer als die der β-Linien. Im Falle der L-Serie bestand das Spektrum in der Hauptsache aus je 5 Linien α, β, γ, δ und ε, die in der Reihenfolge fallender Intensität und Wellenlänge aufgezählt sind. In Analogie zu den Resultaten von Barkla ergab sich nun, daß beim Fortschreiten im periodischen System in der Richtung steigender Atomgewichte die Frequenz einander entsprechender Linien von Element zu Element fällt. Moseley zeigte auch, daß die Quadratwurzel aus diesen Frequenzen in ad-

1) Zusammenfassender Bericht im Jahrb. d. Radioakt. u. Elektron. **8**, 471, 1911.

1) Jahrb. d. Rad. u. Elektr. **11**, 308, 1914.
2) Ibid. 346.
3) Vgl. auch J. Malmer, Phil. Mag. **28**, 787, 1914.

nähernd linearer Abhängigkeit von der Ordnungszahl der Elemente im periodischen System sich befindet, während sich zum Atomgewicht keine eindeutige Beziehung zeigte. So liegt die Frequenz vom Kobalt zwischen denen von Eisen und Nickel, was auch der Reihenfolge, die diesen Elementen auf Grund ihrer chemischen Eigenschaften im periodischen System zugewiesen wird, entspricht, obwohl das Atomgewicht des Kobalts höher ist, als die Atomgewichte von Eisen und Nickel. In Fig. 1 ist die Quadratwurzel aus der Frequenz der α-Linien der K- und der L-Serie als Ordinate gegen die Ordnungszahl der Elemente als Abszisse aufgetragen. Für die obere Gerade (K-Serie) gilt die Beziehung

$$\nu = \frac{3}{4}\nu_0 (N-1)^2,$$

für die untere (L-Serie)

$$\nu = \frac{5}{36}\nu_0 (N-7{,}4)^2$$

wo ν_0 die Rydbergsche Fundamentalfrequenz bedeutet, während N die Ordnungszahl des Elementes ist, wenn die des Aluminiums zu 13 angenommen wird.

Aus diesen einfachen Beziehungen muß man folgern, daß in den Atomen der Elemente eine fundamentale Größe (N) enthalten ist, die je um eine Einheit steigt, wenn man sich von Stelle zu Stelle des periodischen Systems bewegt. Es ist höchstwahrscheinlich, daß diese Größe in Übereinstimmung mit der van den Broekschen Hypothese eben die positive Kernladung ist. Daß die Frequenz der jedenfalls nahe dem Atomzentrum befindlichen Elektronen, deren Schwingungen für die Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlen verantwortlich gemacht werden, mit der Kernladung steigt, ist qualitativ durchaus verständlich[1]), denn mit letzterer steigt auch die auf das Elektron wirkende Anziehungskraft. Es ist aber bis jetzt noch nicht gelungen, die Moseleyschen Beziehungen auf Grund dieser Vorstellung genau abzuleiten. Ein Zusammenhang mit der Bohrschen Strahlungstheorie ist jedoch wahrscheinlich[2]), wenn auch noch nicht erwiesen[3]). Auf einige wichtige Anwendungen der Moseleyschen Resultate werden wir später noch eingehen.

1) (12) S. 498.
2) (13) W. Kossel, Verh. d. D. physik. Ges. **16**, 953, 1914.
3) F. A. Lindemann, ibid. **16**, 281, 1914. J. W. Nicholson, l. c. Bohr, Phil. Mag. **30**, 412, 1915.

IX. Eigenschaften isotoper Elemente.

1. Theoretisches[1]).

Als Grundlage für die Diskussion der voraussichtlichen Eigenschaften der Isotopen soll das Rutherford-Bohrsche Atommodell dienen. Es sind dann vor allem scharf zu trennen die Kerneigenschaften und die Elektroneneigenschaften.

Die Kerne isotoper Elemente weisen das Gemeinsame auf, daß die algebraische Summe der sie zusammensetzenden positiven und negativen Ladungen gleich ist. Die Zusammensetzung der Kerne ist aber eine recht verschiedene, und es enthält z. B. der Kern von *RaG* um zwei α-Teilchen und vier negative Elektronen weniger als der Kern seines Isotopen *RaB*. Es ist also klar, daß die Konstitution der Kerne der Isotopen im allgemeinen eine verschiedene sein wird, und es sind somit für alle Eigenschaften, die im Kerne ihren Sitz haben, Unterschiede zwischen den Isotopen zu erwarten. Soviel wir wissen, gehört zu diesen Eigenschaften, außer der Masse, die Radioaktivität. Man wird deshalb, auf Grund der tatsächlich vorhandenen Unterschiede zwischen den radioaktiven Eigenschaften der Isotopen und besonders aus deren Abhängigkeit vom Atomgewicht, Gesichtspunkte für die noch ganz offene Frage der Struktur der Kerne finden müssen.

Was nun die außerhalb des Kernes befindlichen Elektronen anbelangt, so ist sowohl ihre Zahl wie auch die Konfiguration, bis auf die weiter zu besprechenden kleinen Unterschiede, für die Isotopen als gleich zu erwarten, denn die erste hängt ja nur von der positiven Ladung des Kernes ab, die zweite von der elektrostatischen Wirkung des Kernes auf die Elektronen und der letzteren aufeinander.

Aus zwei Gründen werden aber die Eigenschaften (Abstand vom Kern, Schwingungszahl, Ionisierungsspannung usw.) der Elektronen bei den Isotopen nicht völlig identisch sein können (14). Der kleine Einfluß, den die Masse des Kernes auf die Bewegungen der Elektronen ausüben wird, muß bei Isotopen mit ungleicher Kernmasse verschieden sein. So ist nach der Bohrschen[2]) Strahlungstheorie die Rydbergsche Konstante der Spektralserien proportional $\frac{M}{M+m}$, wo M die Masse des Kernes, m die des Elektrons ist. Für zwei

1) Näheres vgl. (3) S. 67, (14), G. v. Hevesy u. F. Paneth, diese Zeitschr. **15**, 797, 1914; **16**, 45, 1915. K. Fajans, ebenda **15**, 935, 1914.
2) Phil. Mag. **27**, 506, 1914.

Bleisorten mit dem Atomgewichte 206 und 207 bedingt dies einen Unterschied in der Schwingungszahl um $1{,}3 \cdot 10^{-6}$ Proz. Weiterhin wird wohl die verschiedene Struktur der Kerne einen gewissen Unterschied in der elektrostatischen Kraft zwischen dem Kern und den Elektronen bedingen. Für die in einer Entfernung von 10^{-8} cm vom Kern befindlichen Elektronen ist nach einer Schätzung des Verfassers (14) dieser Unterschied jedenfalls kleiner als 10^{-3} Proz. Für näher dem Kern liegende Elektronen kann dieser Einfluß evtl. viel größer sein.

Außer diesen Verschiedenheiten der Elektronen, die auf die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Isotopen, wie ersichtlich, nur einen äußerst geringen Einfluß ausüben können, muß noch eine andere Quelle von Unterschieden berücksichtigt werden, wenn man nicht, wie bis jetzt, isolierte Atome der Isotopen betrachtet, sondern wenn diese an andere Atome gebunden sind, sei es an gleichartige — im Raumgitter des festen Elementes, sei es an fremde Atome — in chemischen Verbindungen. Unter der Voraussetzung, daß die zwischen den Atomen wirkenden Kräfte in solchen Fällen ihren Ursprung in den bei isotopen Elementen praktisch gleichen Atomoberflächen haben[1]), folgt dann aus der verschiedenen Masse der isotopen Atome, ein Unterschied in ihrer Atomschwingungszahl. Es müssen somit die von letzterer abhängenden Eigenschaften der Isotopen verschieden sein. So ergibt sich z. B. auf Grund der Theorie der spezifischen Wärme von P. Debye und M. Born und Th. v. Kármán, daß zwei Bleisorten mit den Atomgewichten 206 bzw. 207 zwischen 0^0 abs. und 7^0 abs. einen Unterschied in der spezifischen Wärme von etwa $^3/_4$ Proz. aufweisen müßten. Auch die Wellenlänge der Reststrahlen müßte Verschiedenheiten von ähnlicher Größenordnung aufweisen. Da die Wärmetönung und die freie Energie chemischer Reaktionen eine Funktion der spezifischen Wärme der beteiligten Stoffe ist, so sind auch in chemischen Eigenschaften aus diesem Grunde gewisse, wenn auch sehr winzige Unterschiede zu erwarten. Wie die folgende Besprechung der vorliegenden experimentellen Resultate zeigt, sind diese Unterschiede jedoch so klein, daß sie auch bei sehr genauen Messungen bis jetzt nicht nachgewiesen werden konnten, und man darf deshalb, wie in den vorhergehenden Kapiteln geschehen, in den meisten Fällen die chemischen und viele physikalischen Eigenschaften der Isotopen als praktisch gleich betrachten.

Hingegen werden die Isotopen in denjenigen Eigenschaften, die direkt von der Masse abhängen, wie die Diffusion im Gaszustande, Verhalten beim Zentrifugieren u. a. m. merkliche Unterschiede aufweisen müssen.

Schließlich sei noch erwähnt, daß natürlich in allen den Eigenschaften, die von der Anzahl der anwesenden Atome oder Moleküle abhängen, die Isotopen nicht für gleiche Gewichtsmengen, sondern für äquivalente Mengen übereinstimmen werden. So wird z. B. die molare elektrische Leitfähigkeit oder optische Refraktion in Lösungen der Salze der Isotopen gleich sein, wodurch alle solche Eigenschaften zur relativen Atomgewichtsbestimmung der Isotopen benutzt werden können (s. auch Kapitel IX, 5 u. 6).

Nach diesen allgemeinen Bemerkungen seien die bisherigen experimentellen Resultate besprochen.

2. Radioaktive Eigenschaften.

Es ist unverkennbar, daß in jeder Plejade entweder die α- oder die β-Strahler stark überwiegen, ja es enthalten die Brevium-, Aktinium-, Blei- und Thalliumplejade, so weit bekannt, sogar nur β-Strahler, die Uran-, Emanation- und Poloniumplejade nur α-Strahler. Für die Aufklärung des Baues der Atomkerne wird wohl diese Tatsache, wie auch die früher ausführlich besprochenen Beziehungen zwischen Lebensdauer und Atomgewicht der Isotopen von Bedeutung sein[1]): es ist kaum anzunehmen, daß die Masse als solche auf die Geschwindigkeit des Zerfalles einen Einfluß hat, vielmehr wird diese von der Konstitution des Kernes abhängen. Die erwähnten Beziehungen deuten somit an, daß bei Isotopen die Konstitution der Kerne in einfacher Weise mit der Zahl der Bestandteile zusammenhängt, denn diese Zahl bestimmt ja die Masse der Kerne[2]). Beim Vergleich der Glieder verschiedener Plejaden ist keine eindeutige Beziehung zwischen

1) Eine davon abweichende Vorstellung wurde von F. A. Lindemann (Nature **95**, 7, 1915) entwickelt. Die Entscheidung zwischen beiden Ansichten wird durch Schmelzpunktsbestimmungen an Isotopen möglich sein, wobei die bis jetzt nach dieser Richtung vorliegenden Erfahrungen für die hier vertretene Ansicht zu sprechen scheinen (vgl. (14) S. 643).

1) Vgl. auch die bemerkenswerte Beziehung zwischen der Lebensdauer analoger α-Strahler der 3 Reihen und ihren Ordnungszahlen, die A. van den Broek aufgedeckt hat. (Elster-Geitel-Festschrift S. 431, 1915.)

2) Beachtenswerte Ansätze zur Erklärung der radioaktiven Umwandlungen auf Grund des Rutherfordschen Atommodells sind neuerdings von H. Rausch von Traubenberg, Göttinger Nachrichten 1915, S. 28, diese Zeitschr. **16**, 264, 1915 und von F. A. Lindemann, Phil. Mag. **30**, 560, 1915, gemacht worden.

Lebensdauer und Atomgewicht zu verzeichnen. Beachtenswert ist aber, daß innerhalb jeder der radioaktiven Familien von *U*, *Th* und *Ac* ab bis zu *RaC'*, ThC_2 und AcC_2 die Lebensdauer der α-Strahler mit dem Atomgewicht stetig abnimmt. Bei den C_1-Gliedern und *RaF* trifft dies jedoch nicht mehr zu[1]).

Wie man sich leicht überzeugen kann, ist bei isotopen α-Strahlern auch die Reichweite der α-Strahlen vom Atomgewicht abhängig, und zwar in entgegengesetzter Weise wie die Lebensdauer. Bei den β-Strahlern ist es vorerst schwieriger zu entscheiden, ob ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Atomgewicht und Härte der Strahlen vorliegt, weil ja das β-Spektrum ein sehr kompliziertes noch wenig aufgeklärtes Phänomen darstellt[2]); mit diesem Vorbehalt kann man jedoch, auf Grund der in Tabelle 1 angegebenen Absorptionskoeffizienten der β-Strahlen, bei den Gliedern der Blei- und Thalliumplejade feststellen, daß mit fallendem Atomgewicht die β-Strahlen der Isotopen weicher werden[3]).

3. Röntgen- und γ-Strahlen-Spektrum.

Die Entstehung der Röntgen- und γ-Strahlen wird mit Bohr u. A.[4]) auf die Schwingungen von Elektronen zurückgeführt, die nahe dem Atomkern liegen. Die charakteristischen Röntgenstrahlen der Isotopen wurden bei üblicher Erregungsart im Röntgenrohr bis jetzt nicht untersucht. Ein um so größeres Interesse beanspruchen die Untersuchungen der γ-Strahlen von Sir Ernest Rutherford und seinen Mitarbeitern. Nach Rutherford[5]) stellen die von den Radioelementen emittierten γ-Strahlen ihre charakteristische Röntgenstrahlung vor, die beim Durchgang der aus dem Kern kommenden β-Teilchen in den Elektronen des Atoms erregt werden. Rutherford und E. N. da C. Andrade[6]) verglichen nun die Wellenlängen der weichen γ-Strahlen des *RaB* mit den Wellenlängen der sekundären γ-Strahlen, die im gewöhnlichen Blei durch Bombardierung mit β-Strahlen erregt werden, und fanden, daß sie für die stärksten zwei Linien innerhalb der Versuchsfehler von ca. $^1/_2$ Proz. übereinstimmen. Die gleiche Übereinstimmung zeigt die Wellenlänge einer dieser Linien mit der auf Grund der Moseleyschen Beziehung für die α-Linie der L-Serie des Bleies zu erwartenden Wellenlänge[1]). Da nun die Wellenlänge der charakteristischen Strahlen eine so eindeutige Beziehung zu den Ordnungszahlen der Elemente aufweist, so bestätigen diese Resultate in überraschender Weise den auf Grund der chemischen Untrennbarkeit des *RaB* vom Blei gezogenen Schluß, daß diese Elemente isotop sind. Faßt man weiterhin mit Moseley die Wellenlänge der charakteristischen Strahlen als das Maß der Kernladung des Atoms auf, so wäre durch die Versuche von Rutherford und Andrade experimentell bewiesen, daß die isotopen Elemente *RaB* und Blei die gleiche Kernladung haben.

In Übereinstimmung damit steht weiterhin der Befund derselben Autoren[2]), daß die stärkste Linie der harten γ-Strahlen des *RaB* nahe die gleiche Wellenlänge aufweist, wie sie durch Extrapolation der Moseleyschen Beziehung für die α-Linie der K-Serie des Bleies sich ergibt. Hier ist die Übereinstimmung innerhalb der Versuchs- bzw. Extrapolationsfehler von einigen Prozenten erwiesen.

Inwieweit sich diese Übereinstimmung auf das ganze Röntgenspektrum der Isotopen erstreckt, läßt sich vorerst nicht entscheiden. Die Absorptionsmessungen[3]) an γ-Strahlen der Isotopen *RaB*, *ThB*, *AcB* und *RaD* bzw. *ThD* und *AcD*, deren Resultate in der Tabelle 1 wiedergegeben sind, beweisen, daß wenn auch die γ-Strahlen der Isotopen einen ähnlichen Charakter aufweisen, die Absorptionskoeffizienten Unterschiede zeigen, die sicherlich außerhalb der Versuchsfehler liegen. Auf eine interessante Erklärungsmöglichkeit dieser Tatsache vom Standpunkte des Kernatoms hat neulich Rutherford[4]) hingewiesen.

4. Ultraviolettes und sichtbares Spektrum.

F. Exner und E. Haschek[5]) einerseits, A. Russell und R. Rossi[6]) andererseits haben das Spektrum von Ionium-Thorium-Präparaten untersucht, und konnten weder im Sichtbaren noch im Ultraviolett einen Unterschied gegen das Spektrum des reinen Thoriums feststellen, obwohl der Gehalt an *Io* in ihren Präparaten

1) Vgl. auch St. Meyer, Elster-Geitel-Festschrift 157, 1915.
2) Vgl. z. B. E. Rutherford und H. Robinson, Phil. Mag. **26**, 717, 1913.
3) Vgl. auch E. Marsden und P. B. Perkins, Jahrb. d. Radioakt. u. Elektronik **11**, 223, 1914.
4) (12) 498, (13) und W. Kossel, Verhandl. d. D. physikal. Ges. **16**, 953, 1914.
5) Phil. Mag. **24**, 453, 1912.
6) Ebenda **27**, 854, 1914.

1) Der in Fig. 1 für P_8 eingezeichnete Punkt ist diesen Messungen von Rutherford und Andrade entnommen.
2) Phil. Mag. **28**, 263, 1914.
3) Rutherford u. H. Richardson, Phil. Mag. **26**, 943, 1913.
4) Ebenda **28**, 309, 1914.
5) Wien. Ber. **121** (II A), 1075, 1912.
6) Proc. Roy. Soc. 87 A, 478, 1912.

aus radioaktiven Daten sich zu mindestens 16 Proz.[1]) bzw. 10 Proz. ergibt, wenn man auf Grund der neuesten Versuche von F. Soddy[2]) als untere Grenze der Halbwertszeit des *Io* 10^5 Jahre annimmt. Dies legte den Gedanken nahe, daß die Spektren isotoper Elemente gleich sind. Dieselbe Erscheinung fanden nun Richards und Lembert[3]), als sie unter Mitwirkung von P. Baxter die Spektren von gewöhnlichem Blei und von Carnotitblei (Atomgewicht 206,59) verglichen: in dem Gebiet von 2000—4000 A. E. konnte kein Unterschied festgestellt werden. Der in diesen Fällen noch mögliche Einwand, daß in den untersuchten Präparaten, die ja Gemische vorstellen, das Spektrum des einen Bestandteiles durch das des anderen überdeckt wird, trifft wohl für das Bleipräparat von Hönigschmid und Horovitz mit dem Atomgewicht 206,0 nicht mehr zu, da ja letztere Bleisorte wahrscheinlich fast reines *RaG* vorstellt: aber auch in diesem Falle konnte E. Haschek[4]) keinen Unterschied in dem Gebiete zwischen 2400 und 4500 A. E. gegen das Spektrum des gewöhnlichen Bleies, weder im Charakter noch in der Wellenlänge der Linien finden. Die Genauigkeit, mit der die Übereinstimmung der Wellenlänge festgestellt wurde, ist auf Grund des Photogramms auf etwa 0,2 A. E. zu schätzen. Ein etwa bestehender Unterschied in der Wellenlänge der Linien ist also jedenfalls kleiner als $^1/_{100}$ Proz. Bis zu dieser Genauigkeit kann man also die Übereinstimmung der Spektren der isotopen Elemente für erwiesen halten. Dies steht mit den Forderungen des Rutherford-Bohrschen Atommodells in bester Übereinstimmung.

5. Atomvolumen und Dichte.

Wie schon erwähnt wurde, sollte der Radius des äußersten Elektronenringes bei Isotopen mit einem hohen Grad der Genauigkeit gleich sein und dasselbe gilt für das Atomvolumen[5]) beim absoluten Nullpunkt. Oberhalb dieser Temperatur sind wegen der ungleichen Wärmebewegung (Atomschwingungszahl) der Atome der Isotopen im Raumgitter des festen Körpers mit der Temperatur wachsende Unterschiede zu erwarten (14), die aber z. B. für Bleisorten mit dem Atomgewicht 206,0 bzw. 207,1 bei Zimmertemperatur nur etwa $0{,}7 \cdot 10^{-3}$ Proz. erreichen, so daß sie auch bei sehr genauen Messungen kaum zum Vorschein kommen können. Die Dichte der isotopen Elemente müßte also proportional dem Atomgewichte sein, und die Dichte der Verbindungen proportional dem Molekulargewichte, da ja die Volumenänderung bei der Bildung der Verbindung bei den Isotopen auch sehr nahe gleich sein wird. Direkte experimentelle Beweise für die Richtigkeit dieser Erwartungen fehlen noch. Dem früher (Kap. VII, 3) erwähnten Versuche von Soddy haftet für die Frage des Atomvolumens dieselbe Unsicherheit wie für die des Thoriumbleies an. Eine indirekte Bestätigung wird im nächsten Abschnitt erwähnt.

6. Löslichkeit der Salze[1]).

Fraktionierte Fällungen oder Kristallisationen, die die Löslichkeitsunterschiede der Salze ausnützen, gehören zu den feinsten Trennungsmethoden ähnlicher Elemente. Bei Gemischen isotoper Elemente haben aber, wie oben gezeigt wurde, auch diese Methoden versagt. Man muß daraus schließen[2]), daß die Salze isotoper Elemente gleiche molare Löslichkeit haben und im festen Zustande in allen Verhältnissen ineinander löslich sind. Wegen der gleichen molaren Löslichkeit und dem verschiedenen Molekulargewichte der Salze der Isotopen muß die Dichte ihrer gesättigten Lösungen verschieden sein. Fajans mit J. Fischler und besonders mit M. Lembert konnten dies in der Tat in bald zu veröffentlichenden[3]) Versuchen zeigen. Es wurde die Dichte gesättigter Lösungen der Nitrate verschiedener Bleisorten verglichen (bei 24,45°, wobei die Temperatur innerhalb ca. 0,007° konstant gehalten wurde). Für gewöhnliches Blei (207,15) wurde 1,44450. gefunden, für Blei mit dem Atomgewicht 206,57 dagegen 1,44364. Der Unterschied im Gewicht der Lösungen beträgt 2,56 ‰ ihres Gehaltes an Blei (im Mittel 0,335 g pro 1 ccm), was innerhalb der Versuchsfehler dem relativen Unterschied im Atomgewicht (2,80 ‰) der betreffenden Bleisorten gleich ist. Wie ersichtlich, führt das zu einer sehr einfachen relativen Methode der Atomgewichtsbestimmung der Isotopen. Aus den Versuchen folgt, daß die molare Löslichkeit der isotopen Bleisorten innerhalb der Versuchsfehler von $^1/_{10}$ ‰ gleich ist, und daß die Volumina,

1) Durch Atomgewichtsbestimmungen zeigte O. Hönigschmid neuerdings (Kap. VII, 5), daß das Präparat von Exner und Haschek sogar 30 Proz. Ionium enthält.
2) Phil. Mag. **30**, 209. 1915.
3) Zeitschr. f. anorg. Chem. **88**, 446. 1914.
4) Vgl. Hönigschmid und Horovitz, Wien. Ber. **123** (IIA), 2428, 1914.
5) Definiert als Atomgewicht/Dichte.

1) Über die Löslichkeit der Emanationen vgl. (15) S. 466, Fußnote.
2) K. Fajans, diese Zeitschr. **15**, 935. 1914.
3) Zeitschr. f. anorg. Chem., 1916.

die je 1 Mol der isotopen Salze in Lösung einnimmt, auch gleich sind.

7. Elektrochemisches Potential.

Während man die ungefähre Übereinstimmung im elektrochemischen Verhalten der Isotopen schon aus älteren Versuchen von G. v. Hevesy[1]) und aus der Unmöglichkeit, die Isotopen durch Elektrolyse oder Abscheidung auf Metallen zu trennen[2]), folgern konnte, zeigen neuere sorgfältige Untersuchungen, wie weitgehend diese Übereinstimmung ist. Z. Klemensiewicz[3]) hat flüssiges *RaB*- (bzw. *ThB*) *Pb*-Amalgam mit einer Säurelösung fraktioniert gewaschen und gefunden, daß das Verhältnis von *RaB* bzw. *ThB* zum *Pb* in der ersten und zehnten Fraktion bis auf $^1/_2$ Proz. gleich ist. Daraus konnte auf Grund der Nernstschen Formel gefolgert werden, daß das Normalpotential von *RaB* bzw. *ThB* bis auf $2 \cdot 10^{-5}$ Volt mit dem des *Pb* übereinstimmt. G. v. Hevesy und F. Paneth[4]) haben festgestellt, daß das Potential der Kette

$$PbO_2/Pb(NO_3)_2/RaG(NO_3)_2/RaGO_2$$

kleiner als $5 \cdot 10^{-6}$ Volt ist, woraus die Übereinstimmung der Normalpotentiale von PbO_2 und $RaGO_2$ bis auf $5 \cdot 10^{-6}$ Volt auf direktem Wege bewiesen wurde. Mit kleinerer Genauigkeit wurde auch für $RaDO_2$ und PbO_2 die Gleichheit der Normalpotentiale gezeigt.

8. Diffusion.

Die Diffusion im Gaszustande ist eine der wenigen Erscheinungen, auf die eine Trennungsmethode der Isotopen gegründet werden kann. In einem Falle scheint diese Methode in der Tat schon erfolgreich gewesen zu sein. J. J. Thomson hat bei der Untersuchung der Kanalstrahlen im Neon nach der Methode der magnetischen und elektrischen Ablenkung außer der normalen Parabel, die dem Atomgewicht 20 entspricht, eine schwächere gefunden, die auf eine Beimengung eines Gases mit dem Atomgewicht 22 hindeutete. Die Versuche, die F. Aston[5]) zur Isolierung des unbekannten Gases mit Hilfe chemischer Methoden und durch fraktionierte Verdampfung des Neons unternahm, waren ergebnislos, durch fraktionierte Diffusion konnte indessen eine partielle Trennung erzielt werden: die Dichten (bezogen auf O = 16) der äußersten Fraktionen betrugen 20,15 und 20,28 ± 0,02, während die des gewöhnlichen Neons 20,19 ist. Leider liegt bis jetzt nur ein kurzer Bericht über die Versuche vor. Sollten sie sich bestätigen, so hätte man es hier mit einem neuen Glied — Metaneon — der Neonplejade zu tun, wodurch die Komplexität auch bei einem Element mit niedrigerem Atomgewichte erwiesen wäre.

Aus ihrer Beobachtung[1]), daß ein zwischen äquivalenten Lösungen der Nitrate zweier Bleisorten (Atomgewicht 206,0 und 207,2) etwa bestehendes Flüssigkeitspotential kleiner als $0{,}2 \cdot 10^{-6}$ Volt ist, schließen G. v. Hevesy und F. Paneth, daß die Wanderungsgeschwindigkeit der betreffenden isotopen Bleiionen bis auf $^1/_{400}$ Proz. gleich ist. Man muß daraus folgern, daß in Lösungen die Beweglichkeit weniger von der Masse als von dem für Isotopen gleichen Radius der Ionen abhängt.

9. Flüchtigkeit.

Man hat öfters[2]) versucht, Isotope durch fraktionierte Verdampfung zu trennen, jedoch ohne Erfolg. Die Zahl der Fraktionen und die Genauigkeit der Messung war jedoch keine sehr hohe, so daß über den Grad der Übereinstimmung sich vorerst nicht viel sagen läßt. Vom theoretischen Standpunkt läßt sich erwarten, daß, wenn im festen Zustande die Kräfte zwischen den Atomen bei Isotopen weitgehend gleich sind, es auch die Flüchtigkeit sein wird, so daß darin nur winzige Unterschiede wegen der etwas verschiedenen Atomvolumina (Entfernung der Atome) der Isotopen bei höheren Temperaturen zu erwarten sind.

10. Magnetische Eigenschaften.

Die magnetische Suszeptibilität der Nitrate bzw. der Chloride zweier Bleisorten (Atomgew. 206,0 und 207,2) ist nach den Messungen von St. Meyer[3]) innerhalb der Versuchsfehler von ca. 1 Proz. gleich. Daraus folgt, daß der Magnetismus keine Kerneigenschaft vorstellt, was übrigens schon die Abhängigkeit der magnetischen Eigenschaften vom chemischen Bindungszustand zeigt.

1) Phil. Mag. **23**, 628, 1912.
2) W. Metzener, Ber. d. D. chem. Ges. **46**, 982, 1913. F. Paneth und G. v. Hevesy, Wien. Ber. **122** (II A), 998, 1913. A. Fleck (9).
3) C. R. **158**, 1899, 1914.
4) Diese Zeitschr. **15**, 797, 1914 und **16**, 45, 1915, Chemiker Ztg. **39**, 520, 1915.
5) Diese Zeitschr. **14**, 1303, 1913.

1) Chem. Ztg. **39**, 520, 1915.
2) C. Auer v. Welsbach, Wien. Ber. **119** (II A), 1044, 1910. B. Keetman, Jahrb. d. Radioakt. u. Elektron. **6**, 265, 1909. F. Paneth u. G. v. Hevesy, Wien. Ber. **122** (II A), 997, 1913. A. Fleck (9) und Phil. Mag. **29**, 337, 1915. W. Metzener, Ber. d. D. chem. Ges. **46**, 982, 1913.
3) Elster-Geitel-Festschrift S. 146, 1915.

X. Das jetzige System der Elemente.

1. Ordnungszahl und Kernladung als Grundlage des Systems.

Die Aufklärung des Verhältnisses der Radioelemente zum periodischen System und die neuen Anschauungen über die Struktur der Atome haben unsere Ansichten über die Beziehungen zwischen den Elementen wesentlich geändert und vertieft, so daß es sich verlohnt, an dieser Stelle den heutigen Stand des allgemeinen Systems der Elemente zu überblicken.

Am radikalsten muß die Ansicht über die Bedeutung des Atomgewichts sowohl für die Systematik der Elemente als auch für deren übrige Eigenschaften geändert werden. Die Tatsache, daß es Elemente gibt, die trotz Atomgewichtsunterschieden bis zu 8 Einheiten praktisch völlig gleiche Eigenschaften, und andere, die bei gleichen Atomgewichten gänzlich verschiedenes Verhalten zeigen, haben der Ansicht, daß das Atomgewicht die anderen Eigenschaften bestimmt, den Boden entzogen. Nach den neueren Vorstellungen über die Struktur der Atome stellt vielmehr die positive Ladung des Atomkernes diejenige Eigenschaft vor, von der die meisten übrigen in erster Linie abhängen. Die Richtigkeit der van den Broekschen Hypothese vorausgesetzt, kann man somit den Inhalt des periodischen Systems folgendermaßen formulieren: die Eigenschaften der Elemente sind periodische Funktionen der Kernladung ihrer Atome. Allerdings ist die van den Broeksche Hypothese, zwar gut gestützt, doch noch nicht über alle Zweifel erhaben, und es ist, wenn auch viel weniger befriedigend, dennoch sicherer, statt des obigen Satzes zu sagen: die Eigenschaften der Elemente sind periodische Funktionen ihrer Ordnungsnummer im Mendelejeffschen System. Jedenfalls hat es aber keinen rechten Sinn mehr, diejenigen Eigenschaften der Elemente, die für die Isotopen gleich sind, als Funktionen des Atomgewichtes darzustellen, vielmehr muß die Ordnungszahl (bzw. die Kernladung) als unabhängige Variable gewählt werden[1]). Es verdient hervorgehoben zu werden, daß eine ähnliche Auffassung, wenn auch aus ganz anderen Gründen, von J. W. Rydberg[2]) schon seit längerer Zeit vertreten wird.

2. Anomalien des periodischen Systems.

Vom Standpunkte dieser Betrachtungsweise erscheinen die Schwierigkeiten, die die Elementenpaare Tellur-Jod, Kobalt-Nickel, Argon-Kalium verursachten, in einem ganz neuen Lichte. Tellur, Kobalt und Argon haben je ein größeres Atomgewicht als Jod, Nickel und Kalium, und die ersteren müßten deshalb bei strenger Anordnung der Elemente nach steigendem Atomgewicht im periodischen System nach den letzteren kommen. Auf Grund der chemischen Eigenschaften mußte jedoch ihre Reihenfolge im System gerade umgekehrt getroffen werden. Aus den vielen erfolglosen Bemühungen, diesen Widerspruch durch Revision des Atomgewichtes des Tellurs[1]) zu beseitigen, ersieht man am besten wie stark er empfunden wurde.

Nun lehrt die Tabelle 2, daß zwischen Uran und Thallium in vielen linksstehenden Plejaden Elemente vorhanden sind, die ein höheres Atomgewicht haben, als manche Glieder einer rechtsstehenden Plejade. Es ist eben für die Stellung im periodischen System nicht das Atomgewicht, sondern die Kernladung maßgebend, und diese ist nach den Moseleyschen Messungen in der Tat beim Nickel größer als beim Kobalt. Sollte nun an den übrigen Stellen des periodischen Systems eine ähnliche Mannigfaltigkeit der Elemente bestehen, wie sie uns der radioaktive Teil enthüllt hat, so müßte man sich nicht über die obigen Ausnahmefälle, sondern vielmehr darüber wundern, daß die Anordnung der Elemente nach steigendem Atomgewicht nur in so wenigen Fällen von der nach steigender Kernladung abweicht. Die letzten zwei Reihen geben Anhaltspunkte zur Aufklärung dieser Frage. Wie früher gezeigt wurde (Kap. IV), steigen auch hier die Atomgewichte regelmäßig von niederen Gruppen zu höheren, wenn man, um die Analogie zu dem übrigen Teil des Systems richtig zu finden, die Atomgewichte der langlebigsten Glieder der Plejaden als die in das allgemeine System passenden wählt. Erblickt man darin eine Stütze für die auch sonst sehr plausible Ansicht, daß wir bei den gewöhnlichen Elementen nur die langlebigsten (oder Gemische der langlebigsten) Isotopen kennen gelernt haben, so wird man zu der Regel geführt, daß die Atomgewichte der langlebigsten Glieder der Plejaden mit der Kernladung fallen. Das Verhalten der oben erwähnten drei Elementarpaare wird also entweder als eine Ausnahme von dieser Regel anzusehen sein, oder aber einige dieser Elemente

1) Vgl. das Atomvolumen-Ordnungszahl-Diagramm bei St. Meyer, Elster-Geitel-Festschrift S. 146, 1915.
2) Zeitschr. f. anorg. Chem. 14, 66, 1897.

1) Eine Zusammenstellung vgl. G. Pellini, Sammlung chemischer und chemisch-technischer Vorträge 21, 8—11, 1914.

sind nicht die langlebigsten Glieder ihrer Plejaden. Das Suchen nach Isotopen dieser anomalen Elemente ist deshalb vielleicht nicht aussichtslos.

3. Seltene Erden.

Auch in der zu den größten Schwierigkeiten des periodischen Systems gehörenden Frage der Elemente der seltenen Erden, ist durch die neuen Ansichten und hauptsächlich durch die Moseleyschen Versuche ein gewisser Fortschritt zu verzeichnen. Man versteht unter seltenen Erden (im engeren Sinne) eine Gruppe von 14 Elementen, deren Atomgewichte zwischen dem des Lanthans (139,0) und dem des Lutetiums (175,0) liegen, und die trotzdem eine so weitgehende Übereinstimmung ihrer chemischen Eigenschaften zeigen, daß ihre Trennung zu den schwierigsten Aufgaben der analytischen Chemie gehört[1]). Die normale Verteilung dieser Elemente auf alle Gruppen des periodischen Systems würde also mit ihren chemischen Eigenschaften im krassesten Widerspruch stehen. Sie wird aber auch durch die Moseleyschen Messungen an charakteristischen Röntgenstrahlen ausgeschlossen. Die seltenen Erden müßten bei der erwähnten Anordnung zwischen Barium und Tantal in ähnlicher Weise eingeordnet werden wie die Elemente zwischen Kalzium und Niob, und die Zahl der Elemente der seltenen Erden müßte somit 20 betragen, d. h. es müßten 6 noch zu entdecken sein. Die Figur 1, die eine so auffallende Gesetzmäßigkeit zwischen der Ordnungszahl und Wellenlänge darstellt, zeigt jedoch, daß die Ordnungszahl des Tantals 73 ist, wenn die des Bariums zu 56 angenommen wird, die Zahl der möglichen Elemente der seltenen Erden beträgt also nur 16, und es fehlen nur zwei Elemente, nämlich eines (61) zwischen Neodym und Samarium, ein zweites (72) zwischen Lutetium und Tantal.

Eine normale Einordnung dieser Elemente ist also ausgeschlossen. Andererseits darf man auch die oft vorgeschlagene Anordnung aller dieser Grundstoffe zusammen auf je eine Stelle der dritten und vierten Gruppe des Systems, wobei Tantal in dieselbe Horizontalreihe käme wie Barium, nur als eine einfache Art der Darstellung betrachten, und man darf sie keineswegs mit der analogen Anordnung der Isotopen verwechseln, denn nicht nur ist der Unterschied zwischen den chemischen Eigenschaften der seltenen Erden von einer ganz anderen Größenordnung (vgl. Fig. 2) als der bis jetzt nicht nachgewiesene zwischen den Isotopen, sondern die ersteren zeigen im Gegensatz zu den letzteren große Unterschiede im optischen Spektrum, magnetischen Eigenschaften und, wie die Fig. 1 zeigt, auch in den Wellenlängen der charakteristischen Strahlen, d. h. ihre Kernladung ist verschieden, während die der Isotopen gleich ist. Der Gruppe der seltenen Erden kommt also zweifellos eine Ausnahmestellung im periodischen System zu, die normale Periodizität der Eigenschaften in Abhängigkeit vom Atomgewicht, oder richtiger von der Kernladung, erleidet an dieser Stelle eine Unterbrechung, um erst vom Tantal ab wieder normal zu werden. Es ist deshalb wohl am rationellsten, etwa auf die in Tabelle 3 gewählte Weise[1]), diese Sonderstellung der seltenen Erden zum Ausdruck zu bringen. Sehr beachtenswert ist übrigens die Art der Abstufung der Eigenschaften innerhalb der Gruppe der seltenen Erden, auf die B. Brauner[2]) und neuerdings R. J. Meyer[3]) hingewiesen haben. In Fig. 2 ist als Beispiel die Löslichkeit der Oxalate in 1 *n* Schwefelsäure bei 25° nach den Messungen von R. J. Meyer und Frau E. Bodländer[4]) als Funktion der Ordnungszahl dargestellt. Die Kurve zeigt deutlich, daß innerhalb dieser Elementengruppe eigene, noch zu ergründende Gesetzmäßigkeiten herrschen.

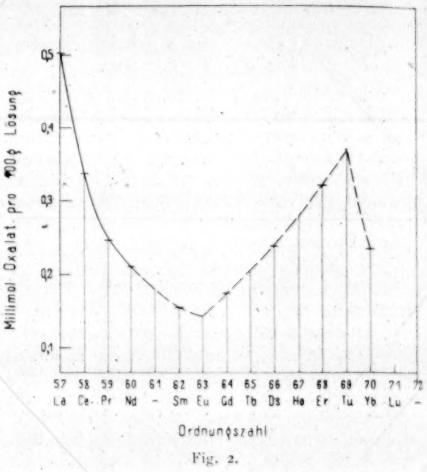


Fig. 2.

1) Näheres vgl. R. J. Meyer, Die Naturwissenschaften **2**, 781, 1914.

1) Vgl. auch (3), S. 20 u. 21, E. Baur, Zeitschr. f. physikal. Chem. **76**, 583, 1911.
2) Zeitschr. f. Elektrochemie **14**, 525, 1908.
3) l. c.
4) Frau E. Bodländer, Dissertation Universität Berlin, 1915.

4. Achte Gruppe.

Es sei auch erwähnt, daß in der Fig. 1 die Triaden der achten Gruppe durchaus nicht als ein Element, sondern als je drei Elemente auftreten, so daß die übliche Zusammenstellung der Triaden auf je eine Stelle des Systems bei evtl. Anwendung der Verschiebungssätze völlig versagen würde. Die Vereinigung der nullten und achten Gruppe in der Tabelle 3 zu einer Gruppe verfolgt auch nur den Zweck, die in den letzten zwei Reihen durch die radioaktiven Umwandlungen so überzeugend bewiesene Kontinuität des Systems auch hier zum Ausdruck zu bringen[1]), was bei der Trennung dieser Gruppen, durch die entstehenden Lücken zuschande gemacht wird. Am besten in dieser Hinsicht ist jedoch eine schraubenförmige Darstellung des periodischen Systems, wobei besonders die von Soddy[2]) vorgeschlagene Form viele Härten der tabellarischen Darstellung vermeidet.

5. Zahl der Elemente.

Die Moseleyschen Versuche bestätigen weiterhin, daß zwei höhere Homologe des Mangans zu entdecken sind. Eines (43) zwischen *Mo* und *Ru*, das andere (75) zwischen *W* und *Os*. Je ein radioaktives Halogen (85) und Alkalimetall (87) sind auch zu erwarten. Sonst dürften zwischen Lithium und Uran alle Elemente, natürlich abgesehen von Isotopen, bekannt sein.

Ob Wasserstoff und Helium die einzigen Elemente vor Lithium sind, d. h. ob dieses Element die Ordnungszahl und Kernladung 3 hat, läßt sich nicht mit Sicherheit entscheiden: Fig 1 gibt ja nur die relativen Ordnungszahlen an. Die Versuche von Rutherford und J. M. Nuttall[3]) über die Zerstreuung von α-Teilchen in Gasen scheinen jedoch dafür zu sprechen, daß die Kernladung des Kohlenstoffatoms, also auch die aller anderen Atome, dem in der Tabelle 3 für die Ordnungszahl angegebenen Wert entspricht. Sollte sich das bestätigen, so müßte man annehmen, daß die Atome der leichten Elemente, Nebulium usw., für deren außerirdische Existenz gewichtige spektroskopische Gründe vorliegen[4]), eine andere Art der Struktur[5]) aufweisen als die irdischen Elemente, denn alle möglichen Kernladungen würden ja durch letztere Elemente erschöpft sein.

1) Vgl. auch Kap. V, 2 c.
2) (3) S. 21.
3) Phil. Mag. **26**, 702, 1913.
4) Vgl. z. B. H. Bourget, Ch. Fabry und H. Buisson, C. R. **158**, 1017, 1914.
5) J. W. Nicolson, ibid. 1322 und Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. 1911—1914.

6. Helium und Wasserstoff als Bestandteile der Elemente und die Umwandlungsfähigkeit der letzteren.

Was die Frage des Aufbaues der schweren Elemente aus einem oder mehreren leichten — ein Gesichtspunkt, der den Kerngedanken der Proutschen Hypothese bildete — anbelangt, so ist ja für die Radioelemente mit Sicherheit bewiesen, daß sie Helium als Bestandteil enthalten, und zwar ist es nach der Rutherfordschen Theorie anzunehmen, daß der Heliumkern einen integrierenden Teil der radioaktiven Kerne bildet. Nimmt man dasselbe für die Atome der leichteren Elemente an, so werden die von J. W. Rydberg[1]) aufgedeckten Regelmäßigkeiten der Atomgewichte verständlich, die am Anfange des Systems besonders auffallend sind. Man findet dort zwei Reihen von Elementen, deren Atomgewichte sich je um ca. 4 Einheiten unterscheiden. Es sind dies *Li*, *B* (*N*), *F*, *Na*, *Al*, *P*, *Cl* und *He* (*Be*), *C*, *Ne*, *Mg*, *Si*, *S*, und in beiden Fällen entspricht einer Atomgewichtsveränderung um 4 Einheiten eine Verschiebung in die zweitnächste Gruppe, was vollkommen an die α-Umwandlungen erinnert. Wenn dabei die Unterschiede zwischen den Atomgewichten zwar sehr nahe, aber nicht genau 4,0 Einheiten betragen, so käme in erster Linie[2]) als Erklärung die Annahme in Betracht, daß man es wenigstens bei einigen dieser Elemente mit Gemischen von Isotopen zu tun hat. Eine experimentelle Prüfung dieser Hypothese ist ohne weiteres möglich, denn nach ihr müßte sich z. B. Chlor durch fraktionierte Diffusion usw. in zwei Bestandteile mit verschiedenem Atomgewicht trennen lassen.

Aber selbst wenn man die meisten Elemente als Gemische von Isotopen betrachtet, kann Helium nicht der einzige Bestandteil schwererer Elemente sein, denn Lithium mit dem Atomgewichte 6,94 könnte nur dann als Gemisch von Elementen, deren Atomgewichte ganze Vielfache von 4 sind, angesehen werden, wenn eines der Isotopen das Atomgewicht 4 hätte, also Helium selbst wäre, was natürlich widersinnig ist. Man muß also mindestens noch einen zweiten Bestandteil annehmen, und es ist naheliegend an Wasserstoff zu denken. Daß der Atomgewichtsunterschied zwischen Thorium (232,15) und Uran 1 (238,18), die

1) Zeitschr. f. anorgan. Chem. **14**, 66, 1897.
2) Man könnte auch daran denken, daß die Masse eines schwereren Atoms zwar sehr annähernd, aber nicht streng die Summe der Masse seiner Bestandteile vorstellt. Vgl. R. Swinne, diese Zeitschr. **14**, 145, 1913; W. D. Harkins u. E. D. Wilson, Journ. Am. Chem. Soc. **37**, 1367, 1915.

wohl als einfache Elemente anzusehen sind, mit so großer Annäherung als $He + 2H$ (oder $2He - 2H$) sich darstellen läßt, und der zwischen Neon (20) und Metaneon (22) als $2H$, wäre dann leicht zu verstehen. Das vermutliche Atomgewicht des Aktiniums und vor allem die neuesten Versuche von E. Marsden und W. C. Lantsberry[1]), die auf die Existenz von Wasserstoffumwandlungen hindeuten, wären als weitere Stützen für diese Hypothese anzusehen. Da vom Standpunkte der Rutherfordschen Theorie der Wasserstoffkern mit einer positiven Ladung den Bestandteil der schwereren Kerne bilden müßte, so wäre bei solchen Wasserstoffumwandlungen eine Verminderung der Ordnungszahl um 1 Einheit zu erwarten. Vielleicht beruhen die genetischen Beziehungen zwischen den seltenen Erden, deren Existenz durch das gemeinsame Vorkommen dieser Elemente in Mineralien wahrscheinlich gemacht wird, auf Wasserstoffumwandlungen: in der Tat ist Wasserstoffgas in sehr vielen Mineralien der seltenen Erden aufgefunden worden[2]).

Über die sehr verlockende Frage, ob die Umwandlungsfähigkeit allen Elementen eigen ist, läßt sich nicht viel mehr sagen, als daß nichts gegen eine solche Hypothese spricht. Denn der Mangel nachweisbarer radioaktiver Eigenschaften kann nicht als Gegenbeweis dienen, wie die Beispiele des Mesothorium 1 und Aktiniums zeigen[3]). Stellt man sich auf den Standpunkt dieser Hypothese, und betrachtet die Häufigkeit des Vorkommens der gewöhnlichen Elemente als ein Maß ihrer Lebensdauer, so führt[4]) die von E. Clarke[5]) hervorgehobene Abhängigkeit der Häufigkeit chemisch analoger Elemente von ihrem Atomgewicht zu ähnlichen Beziehungen zwischen Atomgewicht und Lebensdauer der Glieder einer Gruppe des periodischen Systems, wie die innerhalb der Plejaden geltenden.

Daß übrigens die Radioaktivität nicht an hohes Atomgewicht gebunden ist, zeigen die Beispiele der radioaktiven Elemente Kalium und Rubidium[6]). Ob die β-Strahlen dieser Alkalimetalle von der Hauptmasse des Elementes selbst oder von Beimengungen kurzlebigerer Isotopen herrühren[1]), wird sich wohl durch fraktionierte Diffusion im Dampfzustande oder durch Zentrifugieren feststellen lassen. In beiden Fällen müßte eine β-Umwandlung zu Isotopen des Kalziums bzw. Strontiums führen, woraus sich auch ein Weg zur Aufklärung dieser Frage ergibt[2]).

7. Räumliche Darstellung des Systems der Elemente.

Zum Schluß einige Worte über eine zweckmäßige Form der Darstellung des heute bekannten Systems der Elemente. Es kann jetzt weniger als jemals einem Zweifel unterliegen, daß die Mendelejeff-Meyersche Tabelle die Zahl der möglichen chemisch verschiedenen Individuen oder, genauer ausgedrückt, die Zahl der möglichen Kernladungen erschöpft. Um durch die Einordnung der Isotopen, die die Zahl der Elemente ungeheuer vermehren, die Verbildlichung dieser fundamentalen Erkenntnis nicht zu stören, ist es am rationellsten, die Isotopen an den zugehörigen Stellen des gewöhnlichen Systems nicht in derselben Ebene, sondern senkrecht zu ihr in der Reihenfolge ihrer Atomgewichte anzuordnen. Die gewöhnliche Tabelle des periodischen Systems wäre dann eine Projektion eines wirklichen räumlich gedachten Systems[3]), längs dessen dritter Achse die Kernladung konstant wäre, und hauptsächlich nur das Atomgewicht und die Lebensdauer als Variable auftreten würden. In der Projektionsebene wären nach der früher vertretenen Auffassung die langlebigsten Glieder der Plejaden zu fixieren. Wie ja wahrscheinlich gemacht wurde, unterscheiden sich die Isotopen, wenn auch in einem sehr winzigen Grade, wohl auch in ihren meisten physikalischen und chemischen Eigenschaften. Da nun diese Unterschiede mit der Verschiedenheit der Atomgewichte der Isotopen zusammenhängen, so werden also längs der dritten Achse unseres Systems alle Eigenschaften als eindeutige Funktionen des Atomgewichtes auftreten (14). Natürlich hat dieser funktionelle Zusammenhang mit dem Atomgewicht nichts Gemeinsames mit dem früher als Grundlage des periodischen Systems geltenden.

1) Phil. Mag. **30**, 240, 1915.
2) W. Ramsay, J. N. Collie und M. Travers, Journ. Chem. Soc. **67**, 684, 1895.
3) (1) S. 535.
4) (15) S. 465.
5) Data of Geochemistry, Bulletin U. S. Geological Survey 1911, S. 37.
6) J. Elster und H. Geitel, Jahrbuch der Radioakt. u. Elektron. **10**, 323, 1913.

1) (15) S. 465 Fußnote.
2) H. Lachs, Ber. d. Warschauer Wissensch. Ges. **8**, 145, 1915.
3) Die Anregung zu diesem Vorschlag verdanke ich einer Unterhaltung mit Herrn Geh. Rat C. Engler. (15), S. 466, (14).

(Eingegangen 20. November 1915.)

BESPRECHUNGEN.

Deutsche Südpolarexpedition 1901—1903. Im Auftrage des Reichsamtes des Innern herausgegeben von Erich v. Drygalski. I. Atlas. Meteorologie. Heft 2, 3, 4. W. Meinardus und L. Mecking, Tägliche synoptische Wetterkarten der höheren südlichen Breiten vom 1. Oktober 1901 bis 31. März 1904. Folio. Tafel 18—322 mit 913 Karten. Berlin, Georg Reimer. 1915. Subskriptionspreis für 2—4 M. 192.— (einzelne Hefte M. 77.—).

Mit diesen drei Bänden wird das große Werk täglicher Isobarenkarten der Gegenden an der Grenze der Antarktis abgeschlossen. Es liegen damit 964 solcher Karten vor, eine gewiß erstaunliche Leistung. Ein Text ist diesen neuen Bänden nicht mehr beigegeben, wohl aber ein kurzes Schlußwort. Aus ihm geht hervor, daß ein Teil des schon veröffentlichten Materials nochmals überarbeitet worden ist, wesentlich, um an Hand der allmählich gewonnenen Erfahrung eine einheitlichere Darstellung zu geben. Dabei konnten denn auch noch die inzwischen erschienenen Ergebnisse der französischen Charcot-Expedition mitverwertet werden, sowie die in Sydney veröffentlichten australischen Wetterkarten.

In diesem Atlas liegt ein wissenschaftlicher Wert, wie ihn keine der Veröffentlichungen der anderen Expeditionen jener Jahre enthält, indem jede nur die Ergebnisse ihrer eigenen Messungen verwendet, hier aber mit wenig Unterstützung durch die anderen beteiligten Staaten, ja selbst gegen deren Widerstand eine Zusammenfassung vollendet wird, welcher die großen Ziele der Forschung die Hauptsache sind. Sie ist im schönsten Sinne international.

Die Karten geben für den ganzen Umfang der Erde die Isobaren zwischen 70 und 30° südlicher Breite für jeden Tag vom 1. Oktober 1901 bis zum 31. März 1904, also für $2^1/_2$ Jahre. Außerdem werden Windrichtung und -stärke, Bewölkung, Niederschläge und Temperatur für die einzelnen Stationspunkte eingezeichnet. Es ist nicht daran zu zweifeln, daß eine derart ausführliche Darstellung unsere Kenntnisse der Witterungsgesetze der Südpolkappe wesentlich vertiefen wird. A. Nippoldt.

David Owen, Recent Physical Research. An account of some recent contributions to experimental physics. Mit 53 Illustrationen. London, The Electrician.

Wie im Vorwort ausgeführt, ist das kleine Buch aus einer Reihe von Aufsätzen entstanden, die in der Zeitschrift „The Electrician" in den Jahren 1910 bis 1913 erschienen sind. Die 13 Kapitel haben folgende Überschriften: 1 u. 2. Positive Strahlen; 3. Rutherfords Untersuchungen über α-Strahlen; 4 u. 5. Curies Forschungen über den Magnetismus; 6. Das Nordlicht; 7. Die Brownsche Bewegung; 8 u. 9. Der Strahlungsdruck; 10. Kurze elektrische und lange Wärmewellen; 11 u. 12 Freie Elektronen in Metallen; 13. Magnetische Körper aus nichtmagnetischen Elementen.

Entsprechend diesen Überschriften werden in klaren Aufsätzen die bekannten Errungenschaften der letzten Jahre Elektrotechnikern oder Chemikern oder älteren Physikstudierenden, etwa im Niveau unserer Oberlehrer-Ferienkurse vorgetragen. Der Autor ist redlich bemüht gewesen, den deutschen Verdiensten gerecht zu werden. Dies ist ihm wohl fast immer gelungen, jedoch hat für die Gasanalyse durch Kanalstrahlen Koenigsberger die Priorität vor J. J. Thomson. Erich Marx.

Silvanus P. Thompson, Radiations visibles et invisibles. Conférences faites à XX l'Institution royale de Grande-Bretagne augmentées de conférences nouvelles traduites et annotées par L. Dunoyer. Paris, Hermann & Fils. 1914. 2. Auflage. Preis 7,50 Fr.

Die Vorlesungen sind populär gehalten und mit einfachen Schulexperimenten, wie sie bei uns überall auch in den Mittelschulen vorgeführt werden, ausgeführt. An Deutschlands Hochschulen wird wohl allgemein in der Experimentalphysik wesentlich mehr geboten, als nach dem vorliegenden Buche in London der Fall ist. Dem Verfasser selbst ist das nicht unbekannt, und er stimmt ein lebhaftes Klagelied an, daß die Universität in London viel schlechter gestellt ist, als die meisten, selbst kleinen Universitäten bei uns. Dabei wirkt es aber doch etwas kurios, wenn er sagt: Le professeur de Physique de l'Université de Londres n'a fait aucune découverte, semblable a celle du professeur Röntgen, pour l'excellente raison, que l'Université de Londres n'a ni appointé un professeur de physique, ni construit un laboratoire où il puisse travailler. — Die Darstellung ist flüssig und klar und sehr anschaulich. Erich Marx.

L. v. Bortkiewicz, Die radioaktive Strahlung als Gegenstand wahrscheinlichkeitstheoretischer Untersuchungen. gr. 8°. VII. u. 84 S. m. 5 Kurven. Berlin, Julius Springer. 1913. M. 4.—.

In der neueren Molekularphysik spielen die molekularen Schwankungserscheinungen eine immer wichtigere Rolle. Es ist deswegen außerordentlich wertvoll, daß in dem Buche von Bortkiewicz eine Arbeit vorliegt, in der die Formeln, die auf die Schwankungserscheinungen anzuwenden sind, ganz streng abgeleitet werden. Behandelt wird vom Standpunkte der Wahrscheinlichkeitsrechnung, wie es der Titel sagt, nur die radioaktive Strahlung. Hier sind besonders zwei Probleme wichtig: einmal das Verteilungsgesetz für die Zeitabstände zwischen zwei unmittelbar aufeinander folgenden Atom-Zerfallserscheinungen, dann das Verteilungsgesetz für die Zahlen der elementaren Zerfallserscheinungen, die auf Zeitintervalle von bestimmter Dauer entfallen. Im Anschluß an die Regenerschen Versuche über die Scintillationen der α-Strahlen wird dann das zweite Problem noch für den Fall erweitert, daß die Zeitintervalle, für welche die Scintillationen festgestellt werden, von verschiedener Dauer sind, und daß es sich dabei um große Zahlen von Scintillationen handelt.

Für den Physiker, der auf dem Gebiete der Schwankungserscheinungen experimentell arbeitet, ist besonders der Teil der Bortkiewiczschen Unter-

suchung von Interesse, wo die Kriterien dafür angegeben werden, ob das Ergebnis einer Schwankungsmessung genügend genau mit dem aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung sich ergebenden Resultat übereinstimmt. Es handelt sich mit anderen Worten darum, wie sich bei einer Reihe von Zahlen der beobachtete mittlere Fehler zu dem entsprechenden mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie errechneten mittleren Fehler verhält. Dieses Problem, das große praktische Bedeutung bei Schwankungsmessungen besitzt, wird auf Grund der von Lexis begründeten Theorie der Dispersion statistischer Zahlenwerte gelöst.

Alle abgeleiteten Gesetzmäßigkeiten werden auch von Bortkiewicz auf vorliegende Experimente angewendet, zu welchem Zwecke die Versuche von Marsden-Barratt, Rutherford-Geiger und Regener herangezogen werden. Es ergeben sich dabei sehr interessante neue Resultate, wie z. B. eine unternormale Dispersion in den Versuchen von Rutherford-Geiger, die durch eine lückenhafte Registrierung zu erklären versucht wird.

Hinzuweisen ist noch auf eine kritische Beleuchtung des (von den Physikern so genannten) Schweidlerschen Gesetzes, sowie auf den Nachweis, daß die abgeleiteten Kriterien der normalen Dispersion auch auf solche Fälle anzuwenden sind, wo es sich, wie bei den Versuchen von Svedberg, nicht um zeitliche, sondern um räumliche Schwankungen handelt.

Für den Experimentalphysiker ist das Buch von Bortkiewicz deshalb von großem Wert, weil erstens möglichst korrekte Ableitungen für die bei radioaktiven Schwankungsmessungen gültigen Formeln gegeben werden, und zweitens, weil hier zum erstenmal eine vollkommen exakte Diskussion des vorhandenen experimentellen Zahlenmaterials ausgeführt wird.

Edgar Meyer.

Nachtrag zur Übersicht über die Kriegsbeteiligung der Deutschen Physiker.

Dr. **Franz Rother**, Assistent am physikal. Institut der Universität Leipzig, ist als Unteroffizier bei den Fliegertruppen tätig.

Personalien.

(Die Herausgeber bitten die Herren Fachgenossen, der Redaktion von eintretenden Änderungen möglichst bald Mitteilung zu machen.)

Habilitiert: An der Universität Zürich Dr. F. Herzfeld für physikalische Chemie.

Berufen: Der ord. Professor der anorganischen Chemie an der Technischen Hochschule Danzig Dr. Otto Ruff in gleicher Eigenschaft an die Technische Hochschule Breslau (zum 1. April 1916), der a. o. Professor der Mathematik an der Universität Bonn Dr. J. Schur in gleicher Eigenschaft an die Universität Berlin.

Verliehen: Dem Privatdozent für Technische Mechanik an der Technischen Hochschule in Darmstadt Regierungsbaumeister Dr.-Ing. Viktor Blaeß der Titel Professor, dem Fabrikbesitzer Dr. Emanuel August Merck in Darmstadt der Charakter als Geheimer Medizinalrat.

Gestorben: Der Adjunkt am Maritimen Observatorium in Triest Astronom Dr. Friedrich Bidschof, der frühere Professor der Chemie an der Marine-Akademie in Greenwich Dr. Heinrich Debus in Kassel, der ord. Professor der Mathematik an der Universität Würzburg Geheimer Rat Dr. Friedrich Prym.

Gesuche.

Physiker,

Dr. phil., langjähriger Fabrikleiter, wünscht sich

zu verändern.

Anfragen unter **K. O. 1710** befördert die Expedition dieses Blattes.

Notizen für die Herren Mitarbeiter!

1. Die **Adresse der Redaktion** ist Göttingen, Nikolausberger Weg 20.

2. Die Physikalische Zeitschrift will vor allem einer rasch orientierenden und anregenden Berichterstattung dienen. Die Mitteilungen müssen daher **auf das Wesentliche beschränkt** und **in möglichst knapper Form** abgefaßt sein. Sie sollen im allgemeinen den Umfang von etwa 8 Spalten nicht überschreiten.

3. Die **Manuskripte** müssen druckfertig eingeliefert werden. Im Interesse rascher Erledigung liegt es, sie auf **einseitig** und deutlich, am besten mit **Schreibmaschine** geschriebenen Blättern einzuliefern.

4. **Zitate** bitten wir in der in den „Fortschritten der Physik" üblichen Form zu geben; auch bitten wir, die vom Ausschuß für Einheiten und Formelzeichen (AEF) vorgeschlagenen Bezeichnungen zu berücksichtigen.

5. Am Schluße der Arbeit bitten wir eine kurze **Zusammenfassung** der wesentlichen Ergebnisse sowie die **Adresse des Autors** beizufügen.

6. **Figurenvorlagen** müssen auf besonderen Blättern **gleichzeitig mit dem Manuskript** und möglichst so eingeliefert werden, daß ihre Reproduktion ohne weiteres erfolgen kann. Reproduktionen auf besonderen Tafeln können, mit Rücksicht auf die hohen Kosten, nur ausnahmsweise ausgeführt werden.

Herausgeber, Redaktion und Verlag der Physikalischen Zeitschrift.

Für die Redaktion verantwortlich Professor Dr. H. Th. Simon in Göttingen. — Verlag von S. Hirzel in Leipzig.
Druck von August Pries in Leipzig.